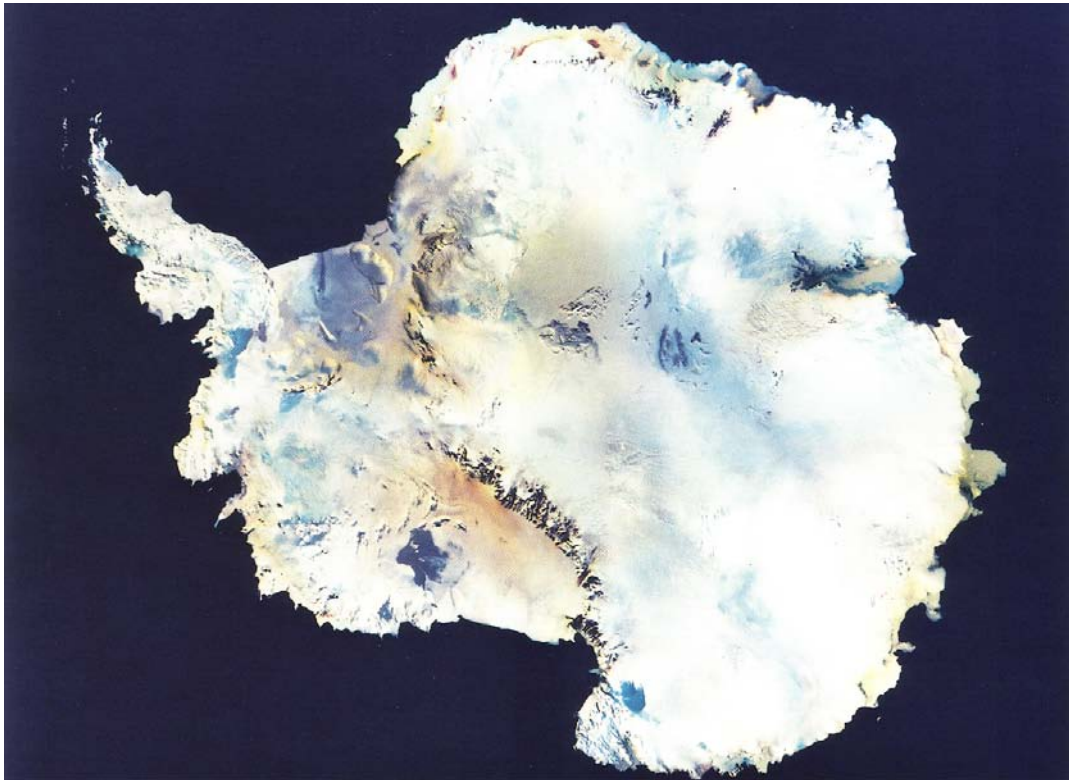


Erdfernerkundung



Official Disclaimer

Warning: This document contains explicit remote sensing theory, expressions and images. Everyone who finds remote sensing to be offensive or objectionable, or is not old enough or otherwise legally not entitled to view such stuff should burn this document immediately.

This document is a beta-version and is provided “as-is”, without any express or implied warranty. In no event will the authors be held liable for any damage, frustration, stress, pregnancy, earthquakes, hair loss of similar consequences arising from the reading of this document.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	5
1.1	Historisches	8
1.2	Ziele der Erdfernerkundung	15
1.3	Ein Beispiel – Definition der Anforderungen	17
1.4	Aufbau der Vorlesung	20
2	Satellitenbahnen	22
2.1	Historisches: ein Apfel fällt um die Erde	22
2.2	Physikalische Grundlagen	24
2.2.1	Eingeschränktes Zweikörperproblem	25
2.2.2	Satellitenbahnen und Erhaltungsgrößen	26
2.2.3	Ellipsenbahnen	28
2.3	Bahnstörungen	32
2.3.1	Übersicht	33
2.3.2	Reibung in der Hochatmosphäre	37
2.3.3	Bahnstörungen in Folge der Erdabplattung	41
2.3.4	Zusammenfassung	43
2.4	Typische Bahnen von erdgebundenen Satelliten	44
2.4.1	Typen von Erdsatelliten	44
2.4.2	Erderkundungs- und Aufklärungssatelliten	44
2.4.3	Einschub: Sonnensynchrone Bahnen	47
2.4.4	Wetter- und Kommunikationssatelliten	48
2.4.5	Navigationssatelliten	51
2.4.6	Forschungssatelliten	52
2.4.7	Zusammenfassung	53
2.5	Stabilisierung des Satelliten	54
2.6	Einbringen des Satelliten in seine Bahn	56
2.6.1	Raketengleichung	56
2.6.2	Mehrstufenprinzip	60
2.6.3	Transferbahnen (Hohmann-Bahnen)	63
2.7	Ergänzung: Spezielle Bahnen	68
2.7.1	Lagrange-Punkte	68
2.7.2	Planetares Billard	73
3	Satelliteninstrumente	82
3.1	Grundlagen	82
3.1.1	Die Atmosphäre	83
3.1.2	Die Magnetosphäre und der Sonnenwind	86
3.1.3	Ein Labor in 900 km Höhe: technische Randbedingungen	90

3.1.4	Grobklassifizierung und Kenngrößen	91
3.2	Passive Instrumente im sichtbaren Spektrum	92
3.2.1	Kurzer Rückblick	93
3.2.2	Kameratypen	95
3.2.3	Abbildung durch Objektive	96
3.2.4	Aufzeichnung der Abbildung: photographische Emulsion	97
3.2.5	Warum Falschfarben?	102
3.2.6	Charakterisierung eines photographischen Systems	105
3.2.7	Elektronische Aufzeichnung statt photographischer Emulsion	112
3.2.8	Scanner in Kehrbesentechnik	118
3.2.9	Scanner: Spiegel statt Objektiv	121
3.2.10	Und der erdgebundene Beobachter?	130
3.2.11	Zusammenfassung	131
3.3	Passive Instrumente im nicht-sichtbaren	131
3.3.1	Thermisches Infrarot	131
3.3.2	Passive Mikrowelleninstrumente	142
3.4	Aktive Instrumente	147
3.4.1	Altimeter	149
3.4.2	Scatterometer	152
3.4.3	Ground-Penetrating Mikrowelleninstrumente	154
3.4.4	SAR Synthetic Aperture Radar	154
3.5	Sounder	159
3.5.1	Prinzip	159
3.5.2	Anwendungsbeispiele	161
3.6	Wunschzettel der 1990er: Mission to Planet Earth	168
3.7	Anwendungsbeispiele	170
3.7.1	Archäologie und Anthropologie	170
3.7.2	Vegetation	172
3.7.3	Hydrosphäre	179
3.7.4	Geowissenschaften	187
3.7.5	Disaster Management und Verwandtes	191
4	Beispiele für Missionen	198
4.1	Der klassische Geograph: LandSat	198
4.2	Ein Meteorologe: MeteoSat	200
4.3	Ein tiefer gelegter Meteorologe: TIROS bis POES	202
4.4	Der Generalist für Umweltfragen: EnviSat	205
4.5	Small is beautiful: CHAMP und Diamant	208
4.6	Der Radarspäher: TerraSAR	210
4.7	Lost and found: GPS-NavStar	211
4.8	Mission to Planet Earth	212
4.8.1	Zielsetzung	212
4.8.2	Earth Observing System EOS – Planung	216
4.8.3	Earth Observing System EOS – Realität	217
5	Die erweiterte Perspektive: CAUSES	222
5.1	Das nahe Erdumfeld	222
5.1.1	Die Strahlungsbilanz	223
5.1.2	Energiereiche Teilchen	232
5.1.3	Magnetosphäre und Ionospäre	241
5.2	Die Sonne	245
5.2.1	Die Instrumente	245
5.2.2	Die Missionen	250
5.3	Der interplanetare Raum	255
5.4	Andere Planeten	257

5.4.1	Das Planetensystem	257
5.4.2	Die Instrumente	259
5.4.3	Die Missionen	259
5.5	CAWSES	260
5.5.1	Modeling Individual Events	262
5.5.2	Monte Carlo Simulation of Atmospheric Ionization	264
5.5.3	Applications of the Model	270
6	Kommunikation	277
6.1	Historisches	277
6.1.1	Rückführung des Filmmaterials	278
6.1.2	Onboard-Scans	279
6.1.3	Technische Anmerkungen	279
6.2	Kommunikation und Information	280
6.2.1	Kommunikation	280
6.2.2	Was ist Information?	282
6.2.3	Informationsgehalt	283
6.2.4	Shannon-Funktion und Entropie	287
6.2.5	Redundanz	288
6.2.6	Abtasttheorem (Signal als kontinuierliche Funktion der Zeit)	294
6.2.7	Menschliche Informationsverarbeitung: Verwendung von Hyperzeichen im Erkennen	296
6.2.8	Zusammenfassung	301
6.3	Codierung I: Quellencodierung	301
6.3.1	Präfix-Code und Decodierbarkeit	301
6.3.2	Redundanzsparende Codes	303
6.3.3	Fundamentalsatz der Quellencodierung	305
6.3.4	Lempel-Ziv-Quellencodierung	306
6.3.5	Historisches Beispiel: Redundanzreduktion beim Fernkopieren	307
6.4	Kanalcodierung	308
6.4.1	Informationsübertragung	309
6.4.2	Kanalkapazität	310
6.4.3	Kanalcodierung: Basics	312
6.4.4	Kanalcodierung: Fehlererkennung	313
6.4.5	Kanalcodierung: Fehlererkennung und -korrektur	315
6.4.6	Kanalcodierung: Hamming(7,4) Codierung	317
6.4.7	Kanalcodierung: Einfache Blockcodierung in Matrixform	320
6.4.8	Zusammenfassung	320
6.5	Anhang: Technische Anmerkungen	320
6.5.1	Überblick	321
6.5.2	Lösungsansätze	322
6.5.3	Kommunikation über Satelliten	324
7	Datenaufbereitung	327
7.1	Korrekturverfahren	328
7.1.1	Fehlende Pixel	329
7.1.2	Periodisch fehlende Streifen	330
7.1.3	Periodische Streifen	332
7.1.4	Random Noise	332
7.1.5	Glätten und Schärfen	333
7.1.6	Dunstkorrektur	334
7.2	Bildverbesserung	337
7.2.1	Kontrastanreicherung	337
7.2.2	Kantenanreicherung	341
7.3	Automatische Klassifikation	344

7.3.1	Distanzverfahren	344
7.3.2	Mehrdimensionale Klassifikationsverfahren	346
7.4	Managing Gigabytes	348
7.4.1	Verlustfreie Bildformate	348
7.4.2	Und JPEG?	348
7.4.3	Fraktale Bildkompression	351
8	Anhang Formalia	357
8.1	Liste der verwendeten Symbole	357
8.2	Nützliche Konstanten	359
8.3	Abkürzungen	359
9	Etwas zum Spielen	364
9.1	Lempel-Ziv-Algorithmus	364
9.2	Bilder in MATLAB	366
9.2.1	Kombination von Spektralkanälen	369
9.2.2	Zerfleddern kombinierter Kanäle	371
9.2.3	Histogramme	371
9.2.4	Filtern	372
9.2.5	MATLAB und das Alphabet	374

Kapitel 1

Einführung

Once a photograph of the Earth, taken from the outside, is available, a new idea as powerful as any in history will be let loose.

Sir Fred Hoyle, 1948, in [194]

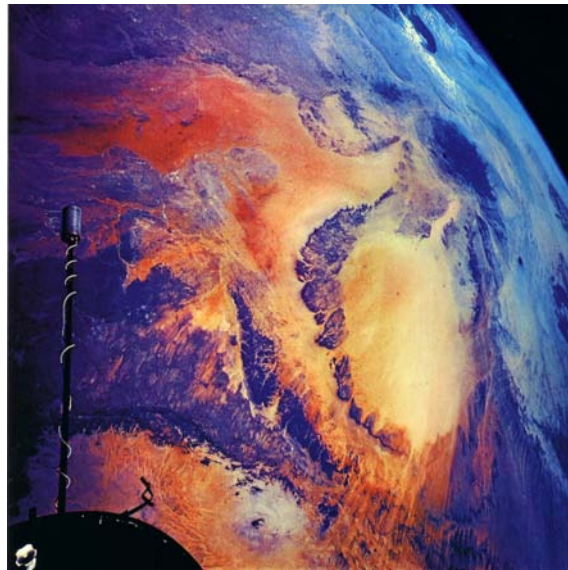
§ 1 Erdfernerkundung im klassischen Sinne hat sicherlich auch einen ästhetischen Aspekt, vgl. z.B. Abb. 1.1 oder Titelbild (AVHRR-Aufnahme der Antarktis). Davon sprechen auch die zahlreichen Bücher [25, 97, 125], in denen (meist photographische) Aufnahmen der Erde vom Weltraum aus gezeigt werden – häufig mehr unter ästhetischen als unter wissenschaftlichen Aspekten. Viele dieser Aufnahmen (und insbesondere ihre modernen Vettern) werden heutzutage kommerziell vertrieben, z.B. für Ikonos, OrbView und GeoEye unter [374], Ikonos unter [367], oder für verschiedene aktuelle Satelliten(instrumente) wie ALOS, ASTER, CartoSat, CBers, FormoSat, GeoEye, Ikonos, LandSat 7 QuickBird, SPOT 5 und WorldView unter [664]. Auf diesen Seiten sind auch eine Vielzahl von Beispielen zu finden, meist sortiert nach Anwendungsbereichen. Auch die NASA hat einiges an Bildern, geordnet nach Satelliten und/oder Sensoren unter [619] ins Web gestellt. Einige große hoch aufgelöste Bilder von Ikonos sind für private Zwecke beim DLR unter [295] zu finden. Und die IPCC-Berichte [105, 106] sind eine Fundgrube für alle möglichen nicht-imaging Anwendungen von Satelliten zur Untersuchung von global change.

§ 2 Die typischen Beispiele der Erdfernerkundung, wie in Abb. 1.2 Osnabrück und das Osnabrücker Schloss in einer Aufnahme des Ikonos-Satelliten,¹ erinnern an deren frühe Ziele: (militärische) Aufklärung und Kartographie. Damit ist die Erdoberfläche als Beobachtungsziel und die Verwendung von Imaging Instrumenten als Beobachtungsverfahren festgelegt. Und auch im Vorbeigehen der Hinweise auf die Wurzeln der Fernerkundung gegeben: militärische Aufklärung – wer mag schon Überraschungsangriffe bzw. möchte nicht bei einem Überraschungsangriff seinerseits am liebsten gleich auf die empfindlichste Stelle des Gegners zielen.

§ 3 Auch die Definitionen von Fernerkundung bzw. remote sensing in Wikipedia sind in ihrer Betonung auf Imaging und Flugzeug/Staellit noch stark von dieser Vorstellung geprägt – Abb. 1.3 nimmt diese Vorstellung wieder auf. So definiert der erste Absatz im Eintrag zu remote sensing ([743], Hervorhebungen von mir):

¹Die Aufnahmen entsprechen den in Google Earth verwendeten – letztere haben außer an den allgemein interessanten Hot Spots auch ein ähnliches Alter.

Abbildung 1.1: Wüstenlandschaft des Fessan (Lybien), aufgenommen 1966 von Gemini XI mit einer Hasselblad mit 38 mm Objektiv aus einer Höhe von 324 km [25]



In the broadest sense, remote sensing is the small or large-scale acquisition of information of an object or phenomenon, by the use of either recording or real-time sensing device(s) that is not in physical or intimate contact with the object (such as by way of aircraft, spacecraft, satellite, buoy, or ship). In practice, remote sensing is the stand-off collection through the use of a variety of devices for gathering information on a given object or area. Thus, Earth observation or weather satellite collection platforms, ocean and atmospheric observing weather buoy platforms, monitoring of a pregnancy via ultrasound, Magnetic Resonance Imaging (MRI), Positron Emission Tomography (PET), and space probes are all examples of remote sensing. In modern usage, the term generally refers to the use of *imaging sensor technologies* including but not limited to the use of instruments *aboard aircraft and spacecraft*, and is distinct from other imaging-related fields such as medical imaging.

§ 4 Auch in der deutsch-sprachigen Variante findet sich unter dem Eintrag Fernerkundung [727] eine ähnliche Betonung (Hervorhebung wieder von mir) – sogar unter Berufung auf eine DIN-Norm:

Die Fernerkundung (englisch: remote sensing) ist die Gesamtheit der Verfahren zur Gewinnung von Informationen über die Erdoberfläche oder anderer nicht direkt zugänglicher Objekte durch Messung und Interpretation der von ihr ausgehenden (Ener-

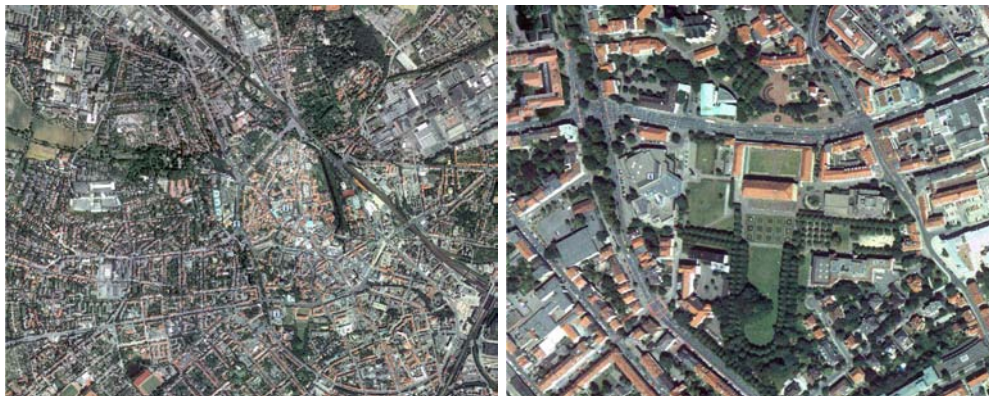


Abbildung 1.2: Osnabrück (links) und Osnabrücker Schloss (rechts) vom Satelliten Ikonos – Google Earth scheint zumindest für Osnabrück auch auf dieses Material zurück zu greifen



Abbildung 1.3: In den typischen Illustrationen zur Erdfernerkundung leben ihre Anfänge wieder auf: Erdfernerkundung zeigt die Erde, wie wir sie aus dem Welt- raum sehen würden [178]

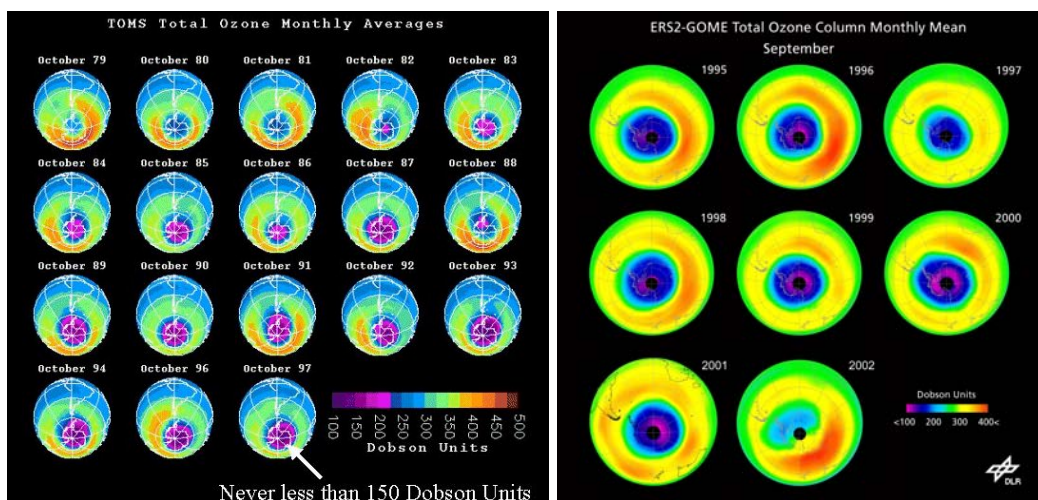


Abbildung 1.4: Ozonloch über der Antarktis: links TOMS-Messungen von 1979 bis 1997 [700], rechts GOME-Messungen zwischen 1995 und 2002 [287]

gie-)Felder. Als Informationsträger dient dabei die reflektierte oder emittierte elektromagnetische Strahlung. [DIN 18716/3]

Im Gegensatz zu anderen Erfassungsmethoden die den direkten Zugang zum Objekt erfordern, versteht man unter Fernerkundung die berührungsfreie Erkundung der Erdoberfläche einschließlich der Erdatmosphäre. Eine berührungsfreie Beobachtung wird zum Beispiel durch *flugzeuggetragene* oder *satellitengetragene* Sensoren ermöglicht (i.e., Fernerkundungssensoren wie *Kameras* und *Scanner*). Vereinzelt kommen aber auch Drohnen und Ballons als Plattform zum Einsatz. Der Fernerkundung zugeordnet sind Photogrammetrie und Satellitengeodäsie. Dagegen sind Planetologie und Astronomie nicht der Fernerkundung zugeordnet, obwohl auch hier Fernerkundungssensoren zum Einsatz kommen.

§ 5 Moderne Erdfernerkundung fotografiert jedoch nicht nur die Erdoberfläche mit ihren offensichtlichen Merkmalen sondern dringt, z.B. zur Erkundung von Bodenschätzen oder für archäologische Fragestellungen, in den Erdboden ein; oder sie stellt im optischen nicht sichtbare Phänomene wie das Ozonloch dar, siehe Abb. 1.4. Mikrowelleninstrumente zur Durchdringung der Wolkenbedeckung, Radar-Instrumente zur Beobachtung der Meeresoberfläche und zur genauen Höhenbestimmung (drei-dimensionale Kartographie) gehören ebenso zu den Instrumenten der Erdfernerkundung.

§ 6 Das Beispiel in Abb. 1.4 gibt gleichzeitig einen Hinweis auf die Vorteile der Satelli-

ten gestützten Erdfernerkundung gegenüber Messungen vom Boden aus: Erdfernerkundung ermöglicht globale Betrachtungen und kann damit die dynamischen Aspekte eines Phänomens besser beschreiben. Und Erdfernerkundung ermöglicht Langzeitbeobachtungen (Monitoring) und ist damit zur Untersuchung von langfristigen Veränderungen (global change) unerlässlich.

§ 7 Im Rahmen des Skripts und der Vorlesung werden wir einen weiten Begriff der Fernerkundung im Hinblick auf die Instrumentierung und die Fragestellungen verwenden. Dafür werden wir uns bei den Trägern der entsprechenden Instrumente auf Satelliten (inklusive Shuttle oder Space Station) und Flugzeuge beschränken. Häufig sind die Schiff-, Boje- oder Boden-gebundenen zur Atmosphärenforschung eingesetzten Instrumente den mit der entsprechenden Fragestellung verbundenen Satelliteninstrumenten ähnlich – abgesehen von der entgegengesetzten Blickrichtung.

§ 8 Eine Erweiterung des Fernerkundungsbegriffes im Hinblick auf mein Arbeitsgebiet erlaube ich mir aber trotzdem: auch wenn die deutsche Wikipedia Definition sehr Erd-gebunden ist, werde ich einige Beispiele aus der Weltraumforschung verwenden – das betrifft den Einsatz von Instrumenten (z.B. Magellan an der Venus) ebenso wie die Untersuchung Solar-Terrestrischer Beziehungen. Letztere werden auch unter dem Begriff Weltraumwetter zusammen gefasst. Auch unter dem Gesichtspunkt der Instrumentierung von Erdbeobachtungssatelliten ist diese Berücksichtigung korrekt: so sind die Wetter- und Erdbeobachtungssatelliten der NOAA, insbesondere die GOES und POES Satelliten, stets auch mit einem Space Environment Monitor SEM ausgestattet.

§ 9 Tabelle ?? gibt einen Überblick über einige universell einsetzbare Satelliteninstrumente mit dem jeweiligen Bodenaufklärungsvermögen und den Spektralkanälen als den wichtigsten Eigenschaften. Viele von ihnen werden wir im Laufe der Vorlesung genauer diskutieren, ebenso wie Instrumente, die speziellen Fragestellungen dienen.

1.1 Historisches

§ 10 Erdfernerkundung oder remote sensing ist keine Erfindung des Satellitenzeitalters (vgl. z.B. Diskussionen und Abbildungen in [41, 231]). Zwar ist der Begriff remote sensing erst in den Sechzigern im US Office of Naval Research eingeführt worden, zu einer Zeit, als sich die Verwendung spionierender Satelliten aus dem militärischen Bereich heraus in den zivilen Bereich ausdehnte; die Idee der Fernerkundung ist jedoch gerade im militärischen Bereich viel älter: jeder Berg oder Turm konnte als Träger für ein remote sensing Instrument dienen – auch wenn letzteres nur ein menschliches, später auch ein mit einem Fernrohr bewaffnetes menschliches Auge ist.

§ 11 Da bei einem Feldzug nicht immer ein geeignet positionierter Berg oder Turm in der Nähe ist und sich letztere auch nicht einfach mitführen lassen, haben sich zumindest die Japaner bereits im 11. Jahrhundert ein der modernen Definition sehr nahe kommendes Verfahren einfallen lassen (siehe Abb. 1.5): ein Drache wird als fliegende Instrumentenplattform verwendet, das Instrument ist wieder der menschliche Beobachter. In diesem Fall sogar mit einem Zusatzfeature, dem Bogen. Die enge Kopplung zwischen Fernerkundung und Militär ist also nicht erst eine Idee von Pentagon und Kreml sondern reicht viel weiter zurück. Satelliten können auch Opfer bewaffneter Attacken werden (die USA haben zum Test einer Anti-Satellitenwaffe den einen Koronographen zum remote sensing der Sonnenatmosphäre tragenden Satelliten SolWind P78-1 verwendet [441]). Daher wird das Abschießen eines (außer Kontrolle geratenen?) Satelliten [648, 767] mit einigem Misstrauen oder zumindest Unwohlsein betrachtet – Reagan’s Star Wars wird wieder wach und ‘The Physics of Space Security’ [259] findet seine Anwendung.

§ 12 Drachen als Instrumententräger, wieder mit dem Menschen als Instrument, wurden in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts auch in Europa angewandt: zum einen war die

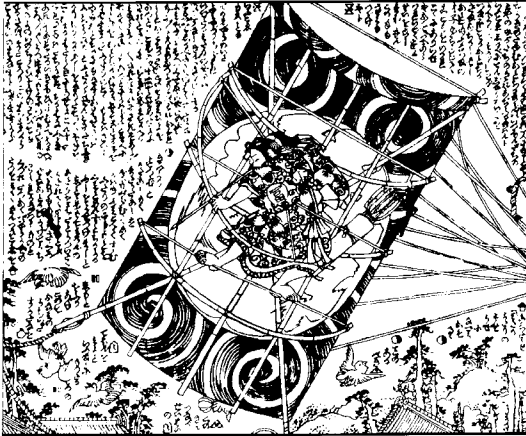


Abbildung 1.5: Erdfernerkundung ohne photographische Aufzeichnung aber mit militärischen Eingriffsmöglichkeiten in Japan [184]

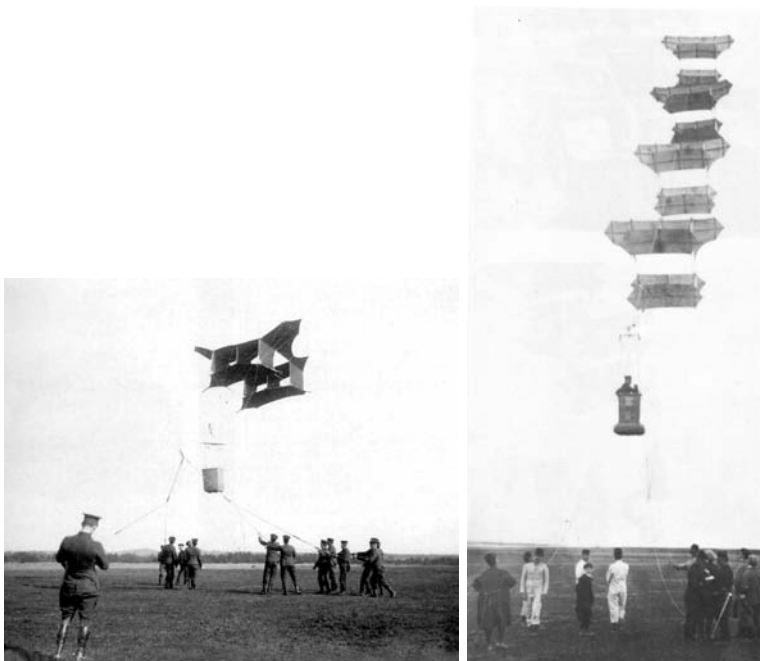


Abbildung 1.6: Erdfernerkundung ohne photographische Aufzeichnung in Europa: links Cody's Kriegsdrachen [285], rechts ein Manlifter [184]

aufkommende Photographie noch nicht soweit automatisiert, dass man Instrumente hätte alleine fliegen lassen können, zum anderen diente der Manlifter (siehe Abb. 1.6) auch für Studien zur Entwicklung von Trägersystemen für Menschen, sprich Flugzeugen. Für den militärischen Kampfeinsatz waren derartige Objekte allerdings auf Grund der zunehmenden Reichweite von Waffen und der großen als Ziel dargebotenen Fläche nicht mehr geeignet – auch wenn das Militär an diesen Entwicklungen maßgeblich beteiligt war.

§ 13 Aber zurück zur Fernerkundung im klassischen Sinne. Photographie ist das entscheidende Stichwort zur Entwicklung des remote sensing. Die ersten Ansätze zum remote sensing finden sich bereits in der Lochkamera und in der Kamera Obscura. Für die Verwendung photographischer Systeme in einem gewissen Abstand von der Erdoberfläche ist das erste überlieferte Photo 1858 von einem Ballon aus in der Nähe von Paris aufgenommen worden – auch hier ist der menschliche Operateur des Instruments erforderlich. SWAMI [686] ist die moderne Variante davon; allerdings ohne Operateure an Bord.

§ 14 Aber auch mit unbemannten Fernerkundungssystemem wurde bereits Ende des 19. Jahrhunderts experimentiert. Das wahrscheinlich am häufigsten zitierte Photo aus dieser



Abbildung 1.7: Aufnahme des zerstörten San Francisco von einer an einem Drachen befestigten Kamera [744]

Phase ist die auch in Abb. 1.7 gezeigte Aufnahme des vom Erdbeben zerstörten San Francisco;² die Aufnahme wurde durch D. Lawrence gemacht, der Instrumententräger war ein Drachen mit einer geschätzten Flughöhe von 2000 ft.³ Diese Kameras mussten automatisiert sein in dem Sinne, dass sie selbsttätig zu einer bestimmten Zeit den Verschluss für eine vordefinierte Belichtungszeit öffneten bzw. bei besseren Versionen nach einer Belichtung auch den Film transportierten, den Verschluss erneut spannten und in einer bestimmten zeitlichen Sequenz die Belichtungen wiederholten. Nach der Entwicklung besonders leichter automatisierter Kameras wurden auch Tauben als Kameraträger eingesetzt. Die Kombination aus einem festen Auslösemechanismus (meist Verzögerung wie beim Selbstauslöser) und einem Instrumententräger mit recht eigenwilligen Vorstellungen bezüglich Flugbahn und Instrumentenausrichtung liefert nur zufällige Ergebnisse – Geduld und wiederholte Versuche sind unerlässlich.

§ 15 Mit dem Aufkommen des Flugzeugs boten sich neue Möglichkeiten der Erdfernerkundung. Auch wenn Bewegung und Vibrationen der Flugzeuge eine Schwierigkeit bei den Aufnahmen darstellten, so eröffneten sie doch neue Möglichkeiten: Kameras an Drachen und Tauben waren durch die manchmal recht eigenwillige Bewegung des Trägers orientiert und ließen sich daher nicht auf ein Zielgebiet ausrichten. Mit einem Flugzeug dagegen bot sich die Möglichkeit, sehr gezielt Luftaufnahmen eines bestimmten Gebietes unter vorgegebenen Bedingungen zu machen. Diese Möglichkeiten wurden während des ersten Weltkrieges zur militärischen Nutzung intensiviert und weiterentwickelt. Nach dem ersten Weltkrieg fanden sich die ersten systematischen zivilen Anwendungen in der Erdfernerkundung, z.B. für forstwirtschaftliche Kontrollflüge, geologische Untersuchungen und zur Sammlung von Luftbildern als Grundlage für die Kartographie – also Anwendungsbereiche, in denen auch die moderne Fernerkundung immer noch eingesetzt wird.

²Das Anwendungsfeld Information und Spendensammlung nach Katastrophen erfüllt Fernerkundung natürlich auch heute noch durch Darstellung der entsprechenden Bilder an prominenter Stelle in den Medien; dazu gehören die Rauchfahnen über Manhattan nach 9/11 (siehe Abb. 3.102) ebenso wie die vorher/nachher Sequenzen nach dem Tsunami im Indischen Ozean 2004 oder die Waldbrände an verschiedenen Stellen (siehe auch Abb. 1.14). Auf ein neues Produkt der Fernerkundung, das Disaster Management, werden wir in Abschn. 3.7.5 noch zurück kommen.

³Zu dem Bild vermerkt [734]: “One of Lawrence’s world renowned photographs is of the ruins of San Francisco, California after the 1906 earthquake. It is a 160-degree panorama from a kite taken 2000 feet (600 m) in the air above the San Francisco Bay that showed the entire city on a single 17-by-48-inch contact print made from a single piece of film. Each print sold for \$125 and Lawrence made at least \$15,000 in sales from this one photograph. The camera used in this photograph weighed 49 pounds (22 kg) and used a celluloid-film plate.” Auch heute kann man mit Photos vom Drachen aus noch Geld machen, siehe z.B. [37]; die neuen Techniken (Lenkdrachen, Digitalkamera, Fernauslösung) bieten dabei wesentlich bessere Kontrolle als es vor einem Jahrhundert der Fall war.

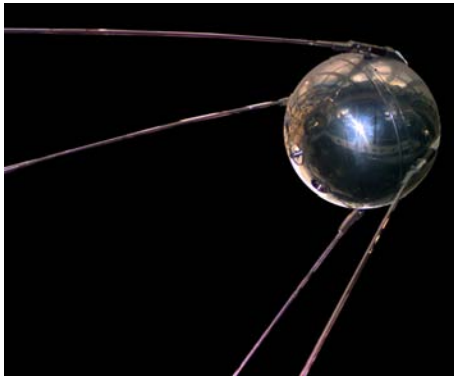


Abbildung 1.8: Der erste Erdsatellit im Modell: Sputnik 1 [749]



Abbildung 1.9: U2 – where the spies have no name [758]

§ 16 Während des zweiten Weltkrieges wurden Luftbilder intensiv zur militärischen Aufklärung verwendet; darunter auch zur Erfolgskontrolle und Zielplanung für Luftangriffe auf Städte, vgl. z.B. [113]. Heute werden die gleichen Bilder vom Kampfmittleräumdienst genutzt, um mögliche Blindgänger zu lokalisieren. Seit den 1930ern wurden auch Versuche durchgeführt, Erdfernerkundung nicht nur im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums zu betreiben, sondern auch im Infraroten und durch die Verwendung von Radar. Ohne diese beiden Sensortypen würde die Fernerkundung heutzutage wesentlich weniger Informationen liefern.

§ 17 Der nächste Sprung in der Erdfernerkundung erfolgte mit dem Beginn des Satellitenzeitalters, markiert durch den Start von Sputnik 1 (siehe auch Abb. 1.8, [403, 749, 750]) im Oktober 1957. Damit war im Bereich der Instrumententräger ein neues Feld eröffnet – da sich die Bahneigenschaften dieser Träger jedoch deutlich von denen der vorher verwendeten Flugzeuge unterschieden, ließen sich die Instrumente nicht direkt umsetzen. Die schönsten Bilder aus den frühen Jahren der Weltraumforschung sind daher auf bemannten Missionen mit Hilfe von Mittelformat-Kameras (meist die legendäre Hasselblad) gemacht – Abb. 1.1 ist ein typisches Beispiel.

§ 18 Der erste zivile Erdfernerkundungssatellit wurde 1960 gestartet, es handelte sich um einen Meteorologiesatelliten der TIROS-Serie (Television and Infra-Red Observation Satellite). Wie der Name dieses Satelliten bereits andeutet, diente er vielfältigen Zwecken: der Meteorologie durch Erzeugung von Bildern im sichtbaren wie Infraroten Bereich ebenso wie der Kommunikation. Die gleichzeitige Verwendung als Kommunikationssatellit ist übrigens bei geostationären Meteorologiesatelliten gebräuchlich; auch die uns aus dem Wetterbericht geläufigen MeteoSats haben eine, wenn auch begrenzte, Aufgabe im Bereich der Kommunikation. Teilweise handelt es sich dabei um das Aufsammeln wissenschaftlicher Daten von unbemannten Stationen, z.B. im Rahmen des ARGOS-Netzes [278] durch die NOAA-Satelliten, oder um die Weiterverteilung bereits bearbeiteter meteorologischer Daten vom globalen Netz der geostationären Satelliten [41].

§ 19 Eine konventionelle (Video-)Kamera in 36 000 km Flughöhe hat selbst bei Verwendung eines Teleobjektivs zwar die gesamte Erdoberfläche im Blick (was für Wettersatelliten

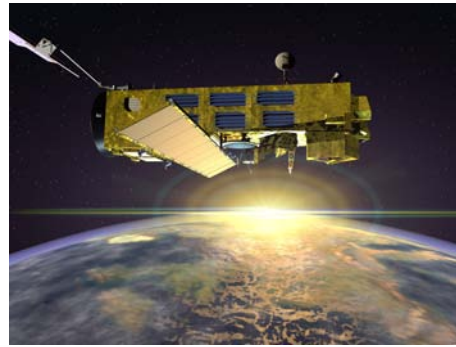


Abbildung 1.10: EnviSat: Europa's Flaggship der Satelliten gestützten Umweltforschung [353]

sicherlich sinnvoll ist) – das Bodenaufklärungsvermögen und damit die Fähigkeit, Details zu erkennen, ist jedoch schlecht. Militärische Fernerkundungssatelliten [751] stellen eher den letzteren Anspruch – die besten Aufnahmen der militärischen Aufklärung stammten daher lange Zeit nicht von Satelliten sondern von der legendären U2 (siehe auch Abb. 1.9). Nach dem Abschuss einer U2 über der Sowjetunion wurde die Erdfernerkundung (Spionage) noch stärker als ursprünglich vorgesehen auf Satelliten verlagert. Die US Spione werden heute alle als KH (KeyHole) Satelliten zusammen gefasst; der erste Vertreter KH-1 startete als Corona im Juni 1959 [722]. Um eine gute Bodenaufklärung zu erreichen, wurden Satelliten in niedrigen Orbits mit konventionellen Schwarz-Weiß-Filmen verwendet. Letztere mussten dann in einer Kapsel per Luftfracht zum Entwickeln geschickt werden (siehe auch Abb. 6.1). Vom Flieger aus wurden die Kapseln im Flug aufgefangen – ein Verfahren, das heute z.B. für Return-Experimente von Ballonen oder Raumfahrzeugen wie Genesis [459, 460] diskutiert wird.

§ 20 Die zivile Erdfernerkundung hat diese Abwurfphase ausgelassen. Aber auch dort bestand der Bedarf nach höherer Auflösung. Die NOAA hat dazu Wettersatelliten in polaren Orbits verwendet, heute die POES-Serie [426, 640], siehe auch Abschn. 4.3. Diese Satelliten haben sich immer stärker zu Monitoring Missionen entwickelt, das Advanced Very High Resolution Radiometer AVHRR und der Tiros Operational Vertical Sounder TOVS sowie die von beiden gelieferten Daten werden uns in der Vorlesung noch häufiger begegnen. POES ist bereits sehr früh als allgemeiner Umweltsatellit ausgelegt gewesen; die LandSat [483] der NASA dagegen sind in Zusammenarbeit mit dem Geological Survey entwickelt und haben daher zumindest in ihrer ursprünglichen Form einen starken kartographischen Schwerpunkt. Gerade für die im sichtbaren Bereich arbeitenden Imaging-Instrumente werden uns diese Satelliten immer wieder als Beispiel dienen. Auch Google Earth greift auf LandSat Daten zurück – allerdings nur die von LandSat 7, da die neueren kommerziellen Späher wie Ikonos und QuickBird das bessere Bodenaufklärungsvermögen haben.

§ 21 Auch Europa ist in der Erdfernerkundung nicht untätig geblieben. Die französischen System pour l'Observation de la Terre SPOT [676] Satelliten verfolgen ähnliche Ziele wie die frühen LandSat Missionen – und sind daher ebenso in Google Earth vertreten. Das Flaggship der (europäischen) Erdfernerkundung dagegen hat sich nicht der Kartographie verschrieben: EnviSat [289, 343, 725] ist als Satellit zur Umweltforschung entworfen – wir werden ihn in Abschn. 4.4 genauer kennen lernen und damit auch den bisher noch nicht betrachteten Bereich der Erdfernerkundung kennen lernen, die Atmosphärenforschung.

§ 22 Nicht nur die Technik der Erdfernerkundung hat sich weiter entwickelt, auch die Organisationsform hat sich verändert. Erdfernerkundung war lange Zeit auf die beiden Blöcke beschränkt – wobei die Westeuropäer bei den Amerikanern mitflogen oder an Missionen beteiligt waren, die Osteuropäer dagegen bei der damaligen UdSSR. Beide Blöcke haben militärische wie zivile Satelliten und Missionen betrieben; der Versuch eines bemannten Weltraumlabor (das nur kurzlebige SkyLab [482, 747] im Westen, die etwas archaische und trotz aller manchmal eher anarchisch gelösten Probleme erfolgreiche MIR [736, 659, 766] im Osten) war noch

Bestandteil dieses “Wettlaufs ins All” [760, 761]. Mit dem Ende des kalten Krieges hat man sich (auch symbolisch) auf die gemeinsame Station ISS [496, 447, 729, 730] geeinigt.

§ 23 Ebenso wie sich nukleare Waffen außerhalb der beiden damaligen Großmächte verbreitet haben, hat es auch die Erdfernerkundung getan: zum einen, da beides eine gemeinsame Technologie, nämlich die Rakete, benötigt, zum anderen, da die Mittelmächte aus dem Schatten der Großmächte hervor treten wollten. Zuerst erfolgte dies mit der ESA noch in einem großen Block – der allerdings stets sehr stark mit der NASA zusammen gearbeitet hat und erst in den 1980er verstärkt die sowjetische Starthilfe genutzt hat. Aber auch einzelne Staaten haben sich im Geschäft der Erdfernerkundung etabliert. So hat sich Frankreich mit SPOT ein eignes Späher-System zugelegt – was mit Schwenkspiegel und guter Bodenauflösung dem schwerfälligen LandSat deutlich überlegen war. Auch Kanada ist sehr früh als selbständiger Satellitenbetreiber eingestiegen (RadarSat). Heute haben wir uns an japanische, indische und chinesische Missionen gewöhnt, auch andere Länder drängen nach – im Februar 2008 hat der Iran mit Kavoshgar (Explorer) seinen ersten Satelliten (mit Rückfahrkarte) als Test für geplante ambitioniertere Projekte gestartet [650].⁴ Immer noch spielen hier geopolitische Erwägungen eine Rolle; der viel zitierte Wettlauf ins All lebt mit anderen Sportlern wieder auf [684].⁵ Dies wird auch aus der Diskussion um den Abschuss eines außer Kontrolle geratenen amerikanischen Spähers z.B. in [647, 767] deutlich, ebenso wie in ‘The Physics of Space Security’ [258].

§ 24 Während immer mehr Staaten in den Weltraum drängen, verschiebt sich die Organisation der Weltraumforschung. So brechen die traditionellen Trennungen zwischen militärischer und ziviler Forschung teilweise auf: in den USA wird das Defence Meteorological Satellite Programm DMSP des DoD mit dem zivilen Polar-orbiting Operational Environmental Satellite POES der NOAA zusammengefasst als National Polar-Orbiting Operational Environmental System NPOESS [368]. Gleichzeitig wird immer mehr an Weltraumforschung und Fernerkundung in Public Private Partnerships betrieben oder ist bereits vollständig kommerziell (wie die in § 1 aufgeführten Anbieter belegen). Das bedeutet jedoch nicht, dass Weltraumforschung und damit auch Erdfernerkundung den Gesetzen eines freien Marktes unterworfen werden – viele der Firmen sind, ebenso wie in der Nuklearbranche, letztendlich nur Staatsfirmen oder Firmen mit einer hohen staatlichen Beteiligung.⁶ Statt einer Kostenersparnis in der relativ teureren Forschung im Weltraum bzw. vom Weltraum aus tragen diese Konstruktionen eher ein Risiko unübersichtlicher Verhältnisse; die outgesourcten US-Soldaten bei Blackwater können vielleicht als Mahnung dafür dienen, welche Nachteile man sich mit solchen Konstruktionen einhandeln kann – Chomsky’s ‘Failed States’ [36] lassen grüßen.

§ 25 Der Hinweis auf Blackwater ist mit Bedacht gewählt: mit dem Ende des Kalten Krieges gibt es nicht mehr die UdSSR (oder den Ostblock oder den Kommunismus) als den Feind. Stattdessen ist die Welt unübersichtlich geworden: es gibt viele Staaten, die (nukleare) Rüstung und Weltraumfahrt nicht mehr als Privileg im wesentlichen der beiden ehemaligen Großmächte akzeptieren wollen (Schurkenstaaten wenn sie einem nicht in den Kram passen, sonst gehören sie natürlich zum Bündnis der Willigen), und es gibt Terroristen. Der wohl definierte Feind, dem man mit militärischen Mitteln entgegen treten konnte, ist verschwunden; die (gefühlte) Bedrohung ist diffus. Also ist nicht das Militär der Heilsversprecher; statt des Produkts Militär wird zunehmend das Produkt Sicherheit verkauft – auch wenn sich häufig

⁴Aus der aktuellen UCS-Liste [692] ergibt sich die folgende Verteilung Anfang 2008 aktiver Satelliten auf Länder: Algeria 1, Argentinia 6, Australia 6, Brasil 7, Canada 11, China (PR) 42, Czech Rep. 1, Denmark 1, Egypt 3, ESA 12, France 16, Germany 10, Greece 1, India 16, Indonesia 6, International 6, Iran 1, Israel 6, Italy 5, Japan 37, Kazakhstan 1, Luxembourg 13, Malaysia 4, Mexico 3, Marocco 1, Multinational 51, Nigeria 2, Norway 2, Pakistan 2, Philipines 1, Portugal 1, Russia 85, Saudi Arabia 10, Singapore 1, South Korea 5, Spain 5, Sweden 4, Taiwan 7, Thailand 4, The Netherlands 5, Turkey 3, United Arab Emirates 2, United Kingdom 10, USA 452.

⁵Selbst die Mondlandung scheint heute wieder eine Option zu sein: zumindest hoffen die Chinesen auf die dortigen Bodenschätze und über bereits fleißig mit Chang’e 1 [652, 720, 721].

⁶Früher nannte man das den ‘militärisch-industriellen Komplex’ [735]. Heute sieht die Bundeszentrale für politische Bildung [271] diesen wieder erwachen.

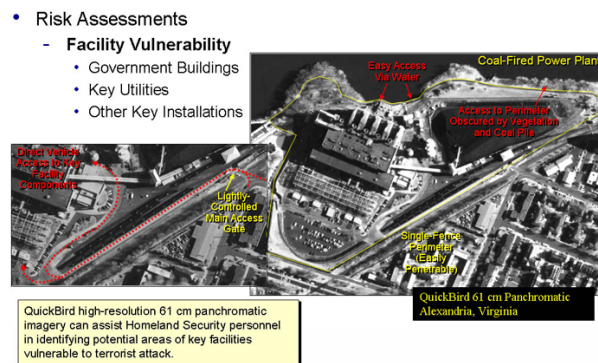
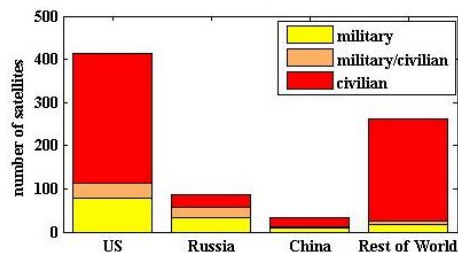


Abbildung 1.11: Sicherheit als Produkt der Erdfernerkundung [667]

Abbildung 1.12: Die zur Zeit aktiven 800 Satelliten aufgeteilt nach Verwendung und Besitzer [692]



nicht das Produkt sondern nur sein Name ändert.⁷ Abbildung 1.11 ist übrigens nicht von einer El-Kaida-Website sondern genau ein Beispiel für ein derartiges Produkt.

§ 26 Die Größenordnungen, um die es im Geschäft mit dem Weltraum geht, veranschaulicht Abb. 1.12. Von den z.Z. ca. 800 aktiven Satelliten ist ungefähr die Hälfte von den USA gestartet und betrieben, der größte Teil der Satelliten ist heute, im Gegensatz zur Frühzeit der Weltraumforschung nicht mehr militärisch sondern zivil. Ungefähr 2/3 dieser Satelliten dienen der Kommunikation (daher sind alleine ungefähr 360 der ca. 800 Satelliten in quasi-geostationären Orbit⁸), ca. 10% der Erdfernerkundung inkl. Meteorologie (zivil). Der älteste noch aktive Satellit ATS-3 (Application Technology Satellite-3, ATS-C) wurde am 15.11.1967 gestartet – er erhält die Kommunikation mit der Antarktis auch heute noch aufrecht.

§ 27 Die Abb. 1.12 zu Grunde liegende Datenbasis wird von der Union of Concerned Scientists UCS betreut und ist unter [692] frei zugänglich. In der Liste finden sich neben den technischen Daten Informationen zu Aufgaben, Betreiber und Hersteller sowie die entsprechenden Links. Außerdem stellt die UCS auf den umgebenden Webseiten einiges an statistischer Auswertung bereit. Eine weitere Quelle selbst für scheinbar nicht existente Satelliten oder gerade einmal abstürzende Trümmer ist das SpaceWarn Bulletin der NASA [615].

§ 28 Neben der Industrie drängen aber auch ursprünglich nicht mit der Weltraumfahrt befasste Firmen und Privatpersonen in den Weltraum – die Privatisierung des Weltalls beginnt [646]? So hat der Ansari X-Prize [764] das Ziel gehabt, nach 40 Jahren endlich wieder technischer Innovationen in der Raumfahrt einzuführen: SpaceShip One [668, 716] ist eines der Ergebnisse. Damit wird der bemannte Weltraumflug eine normale öffentliche Angelegenheit ohne große Voraussetzungen (abgesehen vom nötigen Kleingeld). Jetzt geht es, allerdings unbemannt, einen Schritt weiter: der Google Lunar X-Prize [765][763] fordert zu einer unbemannten Mission zum Mond auf.

⁷Diese Umformung ist nicht nur gefühlt: in Zeiten der asymmetrischen Kriegsführung sind, wie sich ja auch im Irak deutlich zeigt, nicht mehr die großen mechanistischen Systeme gefragt [47, 166].

⁸Ca. 50 weitere der 800 Satelliten fliegen in den für Navigationssatelliten typischem Bereich zwischen 10 000 und 20 000 km; 350 fliegen unterhalb 1000 km, davon 14 unterhalb 400 km.

1.2 Ziele der Erdfernerkundung

§ 29 Nachdem der Mensch nun über Jahrzehnte versucht hat, seine Kameras in immer größeren Höhen zu betreiben, welche Ziele hat er sich davon versprochen und was hat er damit erreicht? Die ersten Ideen hatten sicherlich etwas mit Entdeckergeist zu tun: man wollte sich einen Überblick verschaffen, einen anderen Blickwinkel bekannten Dingen gegenüber finden. Heutzutage ist die Erdfernerkundung wesentlich zielgerichteter; insbesondere sind die Fragen, die an die Satellitendaten gestellt werden bzw. die zur Entwicklung neuer Instrumententypen führen, wesentlich spezieller. Die folgende Auflistung gibt einen unvollständigen Überblick über die Bereiche der Erderkundung, in denen die Verwendung von remote sensing Instrumenten üblich ist.

- Archäologie und Anthropologie
- Kartographie
- Klimatologie: atmosphärische Spurengase, Albedo von Oberflächen und Wolken, Desertifikation, Transmission von Wolken
- Küsten: Erosion, Anlagerung, Meerestiefen, Abwassersysteme, thermische und chemische Verschmutzung, Algenblüte (Bioproduktivität)
- Landnutzung: Verstädterung, Landnutzung in städtischen Bereichen, agrikulturelle Landnutzung, Ernteüberwachung, Bodenfeuchte und Evapotranspiration, Waldüberwachung und -nutzung, saurer Regen, Waldschäden, ungenutzte Flächen, Versalzung, Bioproduktivität
- Meteorologie: Wettervorhersage, Wettersysteme, Wolkenklassifikation, Sounding für Atmosphärenprofile
- Naturkatastrophen: Fluten, Erdbeben, Vulkane, Waldbrände, Landrutsche, unterirdische Kohlefeuer, Hurricanes
- Ozeanographie: Oberflächentemperaturen, Geoid, Topographie des Meeresbodens, Wind, Wellen, Strömungen, Zirkulationssysteme, See-Eis, Ölverschmutzung
- Wassermanagement: Oberflächenwasser, Verschmutzung, Grundwasser, Schnee und Eis, Gletscher(rückgang), Abschmelzen von Eismassen

§ 30 Für einige dieser Bereiche ist der Nutzen der Erdfernerkundung sofort offensichtlich: in der Kartographie bedarf es keiner näheren Erläuterung (und Google Earth hat immer ein gutes Beispiel – wenn auch manchmal vom Flieger). In der Meteorologie haben wir uns an die Verwendung von Satellitendaten für die tägliche Wettervorhersage gewöhnt. Für Instrumente, die in der Ozeanographie zur Bestimmung des Geoids, der Meeresbodentopographie sowie der Windgeschwindigkeiten, Wellen und Strömungen dienen, müssen wir schon etwas trickreichere Instrumente als eine einfache (Video-)Kamera verwenden; wir werden für diese Zwecke verwendbare aktive Mikrowelleninstrumente in Abschn. 3.4.1 kennen lernen. Auch für die Messung atmosphärischer Spurengase oder von Vertikalprofilen atmosphärischer Eigenschaften ist eine Kamera nicht hilfreich – Limb Sounder und ähnliche Instrumente werden wir in Abschn. 3.5 kennen lernen.

§ 31 Noch weniger offensichtlich sind dagegen andere Anwendungen. Wie und mit welchen Instrumenten soll man z.B. Archäologie von einem Satelliten aus betreiben? Wie kann man Wasserreservoirs unter der Erdoberfläche erkennen? Hierzu benötigt man entweder indirekte Verfahren (wie beeinflussen überwucherte Ruinen die Eigenschaften der auf ihnen wachsenden Pflanzen, so dass man diese identifizieren kann), oder man kann mit Hilfe von Mikrowellen oder thermischem Infrarot einen Blick unter die Oberfläche werfen. Einige dieser Anwendungsbeispiele werden im Skript näher erläutert.

§ 32 Für mich liegt gerade in diesen indirekten Methoden der Reiz, diese Vorlesung weiterhin im Rahmen des normalen Physikstudiums anzubieten: es ist die Frage, wie sich mit eingeschränkten Messsystemen (nur reflektierte und emittierte elektromagnetische Strahlung) möglichst viel Information aus einem komplexen natürlichen System heraus kitzeln lässt.

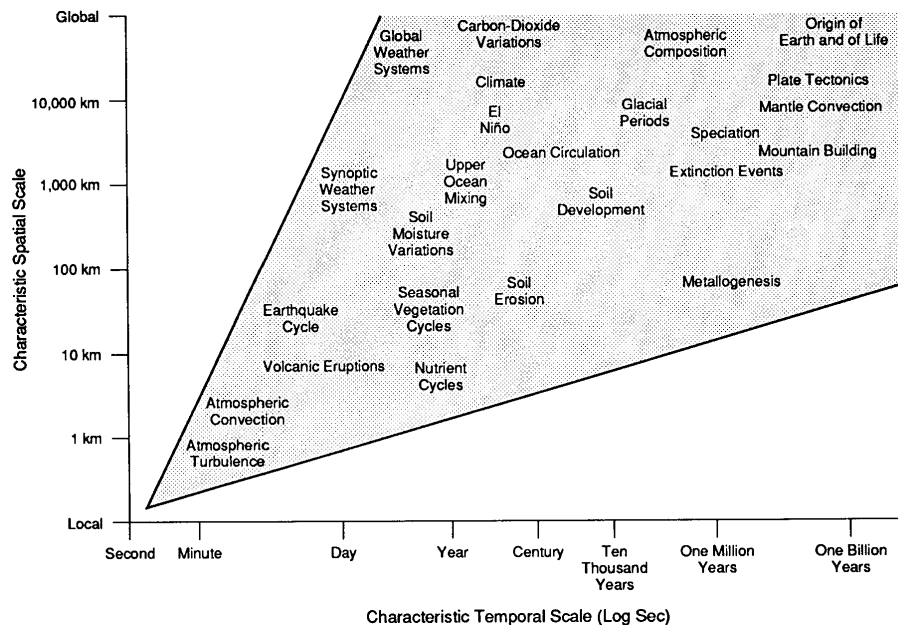


Abbildung 1.13: Charakteristische räumliche und zeitliche Skalen für einige der durch remote sensing beobachteten Schlüsselprozesse auf der Erde [60]

§ 33 Unterschiedlichen Fragestellungen bedeuten gleichzeitig unterschiedliche Anforderungen an die Satelliten und Satellitenexperimente. Das bezieht sich nicht nur auf die Technik des Instruments sondern auch auf die zu untersuchenden räumlichen und zeitlichen Skalen. Für Kartographie z.B. benötigt man eine gute räumliche Auflösung – schließlich möchte man jeden Hochspannungsmast und jede Hütte identifizieren. Die zeitliche Auflösung dagegen kann gering sein; für natürliche wie anthropogene Änderungen sind Zeitskalen in der Ordnung von einem Jahr ausreichend, für geologische Veränderungen (Kontinentaldrift, Gebirgsbildung und -zerstörung) sogar Zeitskalen von Millionen Jahren. Wettersysteme dagegen werden auf ganz anderen Skalen untersucht. Hier sind räumliche Skalen im Bereich von einigen zehn oder hundert Kilometern völlig ausreichend. Allerdings sind Wettersysteme schnell veränderlich, d.h. sie müssen kontinuierlich oder zumindest auf Zeitskalen deutlich kleiner als ein Tag beobachtet werden. Abbildung 1.13 gibt eine Übersicht über die zur Betrachtung verschiedener Phänomene notwendigen räumlichen und zeitlichen Skalen.

§ 34 Das räumliche Auflösungsvermögen ist durch die Eigenschaften des Instruments und die Flughöhe des Satelliten festgelegt. Das zeitliche Auflösungsvermögen dagegen ergibt sich in der Regel aus der Wiederholfrequenz der Satellitenbahn⁹ oder – bei geostationären Satelliten – aus den Instrumenteigenschaften: Satelliten der MeteoSat-Serie befinden sich in einer geostationären Umlaufbahn, d.h. sie haben mit relativ schlechter räumlicher Auflösung kontinuierlich den gleichen Bereich der Erde im Blickfeld. Hier ist die Wiederholfrequenz durch die Eigenschaften des Instruments gegeben; so erzeugen die MeteoSats alle halbe Stunde eine komplette Aufnahme ihres Blickfeldes. Die Wettersatelliten der NOAA Klasse (National Oceanographic and Atmospheric Administration; auch als POES bezeichnet) dagegen fliegen in niedrigen polaren Orbits. Somit ergibt sich ein wesentlich besseres räumliches Auflösungsvermögen und damit die Möglichkeit zum Studium kleinerer Details (wichtig insbesondere bei der Prognose und Diagnose extremer Wetterlagen), allerdings um den Preis, dass jeder einzelne Satellit einen bestimmten Bereich nur ein oder zweimal pro Tag überfliegt.

⁹Mit einer Ausnahme: kann das Instrument geschwenkt werden bzw. befinden sich mehrere Instrumente mit unterschiedlicher Blickrichtung an Bord, wie z.B. auf HRV auf SPOT oder MISR auf Terra, so lässt sich gegebenenfalls auch von einem benachbarten Orbit aus eine Beobachtung vornehmen und damit die Wiederholfrequenz erhöhen.

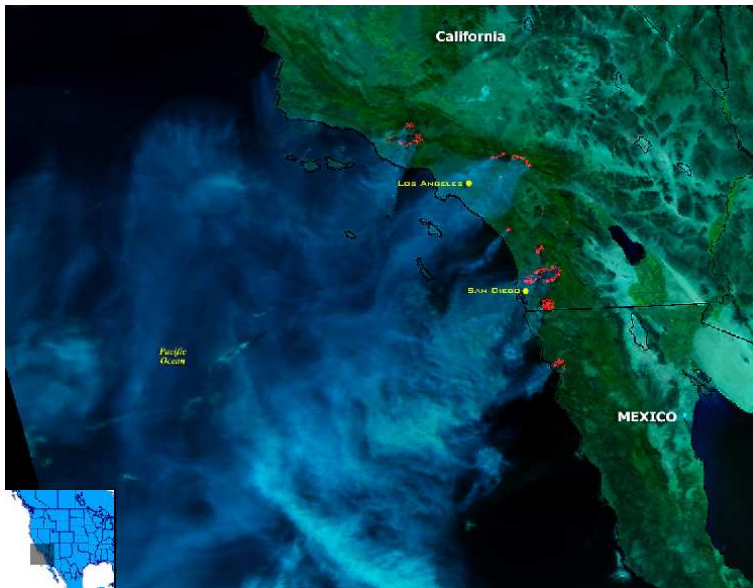


Abbildung 1.14: Waldbrände in Kalifornien vom NOAA Satelliten; Kombination von sichtbaren und IR Aufnahmen [699]

Daher lassen sich mit einem einzelnen Satelliten keine Studien zur Dynamik von Wettersystemen betreiben, hier ist eine größere Zahl von Satelliten notwendig; planmäßig sollten sich stets drei bis vier der NOAA-Satelliten im Orbit befinden.

1.3 Ein Beispiel – Definition der Anforderungen

§ 35 Gehen wir der Frage nach den Eigenschaften von Satellit und Instrument an Hand eines einfachen Beispiels nach. Es wird uns gleichzeitig die beim Entwurf eines Satellitenprojektes zu beachtenden Aspekte veranschaulichen – und damit auch den Aufbau des Skriptes verständlich machen.

§ 36 Ihre Aufgabe ist der Bau eines Satelliten mit geeigneter Instrumentierung zur Detektion von Wald- bzw. Buschbränden in ausgedehnten und dünn besiedelten Gebieten (z.B. Nationalparks in den USA; das Beispiel in Abb. 1.14 passt zwar nicht ganz zu dünn besiedelt – aber Wald- und Buschbrand ist es schon). Diese Waldbrände sollen nicht erst dann entdeckt werden, wenn die Rauchsäule so hoch ist, dass der halbe Bundesstaat in Flammen steht und die Rauchsäule von allen anderen Bundesstaaten aus auch vom Boden gesehen werden kann, sondern bereits dann, wenn man das Feuer noch kontrolliert (z.B. durch Brandschneisen) abbrennen kann: Sie sollen nicht die Situation in Abb. 1.14 vom Satelliten aus entdecken sondern Sie sollen Sie durch rechtzeitiges Entdecken verhindern.

§ 37 Die Lösung dieses Problems ist – wie bei den meisten realen Problemen – nicht eindeutig; sehr unterschiedliche Konfigurationen von Satellit und Instrument(en) sind denkbar. Bei einer Suche nach der Lösung des Problems kann man folgende Strategie verfolgen:

1. was sind die physikalischen (und mit einem remote sensing Instrument nachweisbaren) Eigenschaften des zu untersuchenden Objekts?
2. mit welcher Art von Instrument(en) können diese nachgewiesen werden?
3. mit welcher Genauigkeit müssen diese Größen gemessen werden?
4. wo müssen sie gemessen werden (über den Ozeanen vielleicht nicht unbedingt)?
5. wie oft müssen sie gemessen werden?
6. welche Information über die Eigenschaften des Objekts soll an den Beobachter (d.h. die Bodenstation) übertragen werden?
7. wann soll übertragen werden?

§ 38 Die erste Frage ist die entscheidende; hier ist etwas Brainstorming hilfreich. Wenn wir Feuer nachweisen wollen, brauchen wir uns nur unsere Vorstellung von Feuer zu vergegenwärtigen: der offenbare Aspekt von Feuer sind Flammen, d.h. veränderliche, rötlich-gelbe Leuchterscheinungen und Wärme. Oder in physikalischer Terminologie: ein Feuer emittiert Licht im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums und Wärme, d.h. elektromagnetische Strahlung im thermischen Infrarot.

§ 39 Und die zum Nachweis geeigneten Instrumente (Pkt. 2)? Zum Nachweis der Emission im sichtbaren Bereich reicht es, eine einfache Kamera zu verwenden, die im sichtbaren Bereich des Spektrums beobachtet und damit die zum Feuer gehörenden Flammen nachweist. Allerdings: Feuer ist auch mit Rauchentwicklung verbunden, d.h. unsere Kamera kann das Feuer wahrscheinlich gar nicht sehen, da es unter einer Rauchwolke den Blicken entzogen ist. Also müssten wir beim Nachweis eines Feuers im sichtbaren Bereich des Spektrums die Abbildungen auf Flammen und/oder Rauch untersuchen.

§ 40 Wo wir gerade bei Rauchwolken sind: was macht ein derartiges Instrument eigentlich bei einem Wolken bedeckten Himmel? Dann sieht ein Instrument im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums nur die Oberkante der Wolken, alles darunter entzieht sich seinen Blicken – und der Wald könnte großflächig in Flammen stehen bevor eine Wolkenlücke einmal einen Blick auf das Feuer oder den Rauch gewährt. Und bei einem teilweise bedeckten Himmel ist unter Umständen die Unterscheidung zwischen Wolken und Rauch nicht ganz einfach.

§ 41 Unser Waldbrandnachweiser muss also um etwas ergänzt (oder durch etwas ersetzt) werden, dass auch bei Wolkenbedeckung Informationen vom Erdboden aufnehmen und auswerten kann. Wolkenbedeckung kann von Mikrowellenstrahlung durchdrungen werden, auch im thermischen Infrarot kann man, zumindest teilweise, durch die Wolken sehen. Und ein Sensor im thermischen Infrarot kann auch einen Aspekt eines Waldbrandes nachweisen, nämlich die Wärmeentwicklung – auch dann, wenn das eigentliche Feuer bereits unter einer Rauchwolke verschwindet.¹⁰

§ 42 Unsere Wunschinstrumentierung könnte daher ein Sensor im thermischen Infrarot sein, eventuell ergänzt (für Schönwetter) um einen Sensor im sichtbaren Licht, da im sichtbaren die Informationen für einen menschlichen Dateninterpretier natürlich einfacher auszuwerten sind. Damit hätten wir auch den in Abb. 1.14 verwendeten Datensatz.

§ 43 Bevor wir uns (gemäß Pkt. 3) an eine Spezifikation der Instrumente machen, müssen wir unser Konzept noch überprüfen: zwar würde diese Instrumentkombination die zu untersuchenden Phänomene nachweisen – aber wie oft würde sie einen Fehlalarm auslösen? Unser Infrarotsensor reagiert auf thermische Emission – das ist nicht zwingend ein Waldbrand, auch ein Hochofenabstich, eine startende Rakete, ein Nutz- oder Schadfeuer, das Abfackeln von Erdgas an einer Ölbohrstelle, ein Leck in einer Ölpipeline u.v.a.m. sind mit Wärme und damit einem Signal im thermischen Infrarot verbunden.¹¹ Damit der Satellit nicht immer zu Waldbrandalarm gibt, müssen wir ein Verfahren entwickeln, Waldbrand von den anderen Wärmequellen zu unterscheiden. Bei gutem Wetter kann dabei sicherlich die Kamera im sichtbaren Bereich helfen: das spricht dafür, beide Instrumente zu fliegen und nicht nur den Sensor im thermischen IR alleine. Zusätzlich können wir dem Satelliten eine Karte mit

¹⁰Die roten Punkte in Abb. 1.14 sind übrigens nicht das Feuer im optischen Bereich (letztere sind in den sichtbaren Kanälen nur recht schlecht zu identifizieren) sondern im thermischen Infrarot. Die Abbildung ist also keine direkte Aufnahme sondern eine Kombination von mehreren Aufnahmen in verschiedenen Wellenlängenbereichen. Das ist ein Standardverfahren in der Erdfernerkundung; selbst verschiedene Bereiche des sichtbaren Spektrums werden analog zu den Schichten eines Farbfilms einzeln aufgenommen und später geeignet kombiniert. Auf diese Weise werden auch die Falschfarbenaufnahmen erzeugt – auch der im sichtbaren Teil des Spektrums aufgenommene Anteil von Abb. 1.14 ist nicht in den wahren Farben wieder gegeben.

¹¹Das Problem ist Kalten Kriegern wohl bekannt: startende Interkontinentalraketen lassen sich am einfachsten durch die thermische Emission nachweisen – mit einer riesigen Rate an Fehalarmen durch andere Signale im IR.

geben, auf der Hochöfen und andere stationäre Wärmeproduzenten eingetragen sind, so dass zumindest an diesen Stellen ein Infrarotsignal nicht als Waldbrand identifiziert wird.

§ 44 Bei der Instrumentspezifikation (Pkt. 3) sind wichtige Gesichtspunkte das räumliche und das spektrale/thermische Auflösungsvermögen. Auf Grund der verwendeten großen Wellenlängen haben Sensoren im thermischen Infrarot ein schlechteres Auflösungsvermögen als solche im sichtbaren: größenordnungsmäßig 100 m im thermischen IR vergleichen mit größenordnungsmäßig 10 m im sichtbaren Bereich des Spektrums für die Instrumente der 1980er. Heute sind die absoluten Werte in beiden Spektralbereichen deutlich geringer, aber immer noch gilt: eine Kamera im sichtbaren Bereich des Spektrums erkennt den Ort in unserem Beispiel genauer als ein IR-Sensor.¹² Sie muss ihn auch genauer erkennen, da die Flammen im sichtbaren Bereich (insbesondere wenn unter der Rauchwolke verborgen) einen geringeren Kontrast mit der Umgebung bilden als es die Wärmequelle im IR tut. Daher können Flammen im sichtbaren erst entdeckt werden, wenn sie einen großen Teil des durch die Bodenauflösung gegebenen Bildpunktes (Pixels) ausfüllen, im thermischen IR dagegen muss nur ein kleiner Teil des Pixels in Flammen stehen um dessen Helligkeitswert so weit anzuheben, dass er sich gegen die Umgebung deutlich abhebt.

§ 45 Auf dieser Basis können wir uns jetzt mit einigen ESA oder NASA-Technikern zusammen setzen und die Detailspezifikationen der Instrumente erarbeiten – oder Sie arbeiten das Skript durch und kehren dann zu diesem Beispiel zurück, um die Spezifikationen selbst zu geben.

§ 46 Die Punkte 4 und 5 unserer Liste betreffen nicht mehr die Instrumentierung sondern den Satelliten bzw. genauer dessen Bahn. Selbst wenn die Forstbehörden des Bundesstaats Washington die Auftraggeber für den Satelliten und die Hauptabnehmer der Daten sind, wird es uns nicht gelingen, den Satelliten so zu positionieren, dass er immer über Seattle steht, da sich die Erde unter der Satellitenbahn weg dreht. Daher ist es am ökonomischsten, eine globale Waldbrandüberwachung anzubieten und die Daten an andere Interessenten zu verkaufen. Allerdings brauchen wir keine vollständige globale Überwachung: in der Arktis und Antarktis fehlen die für einen Waldbrand erforderlichen Wälder. Der Satellit kann also auf den Überflug über hohe Breiten verzichten. Dies lässt sich durch die Wahl der Inklination seiner Bahn erreichen. Gleichzeitig ergeben sich bei der geringere Inklination auch längere Verweildauern des Satelliten in den eigentlich interessierenden mittleren Breiten.

§ 47 Die Flughöhe des Satelliten in seiner Bahn hat Konsequenzen für das Bodenauflösungsvermögen und den vom Satelliten während eines Überfluges beobachteten Bereich (Swath Width, Breite des Bildausschnitts rechtwinklig zur Bodenspur). Und damit auch für die Wiederholfrequenz, d.h. die Frequenz, mit der ein bestimmter Punkt auf der Erde von dem Satelliten eingesehen werden kann – für Waldbrandüberwachung ist es nicht ganz optimal, wenn der Satellit nur alle 2 Wochen vorbeischaute. Beide Größen lassen sich durch geschickte Kombination von Flughöhe und Spezifikation des Instruments (insbesondere Blickwinkel; eventuell Möglichkeit des Schwenkens) über einen relativ weiten Bereich einstellen.

§ 48 Bleiben noch die beiden letzten Punkte unserer Liste. Diese betreffen die Behandlung der von den Instrumenten gewonnenen Daten. Für die Waldbrandentdeckung ist es sicherlich nicht sinnvoll, wenn die Daten stets erst an Bord gespeichert werden und dann einmal im Monat an eine Bodenstation gegeben werden. Andererseits ist es bei direkter Datenübertragung für einen Überwacher am Boden vielleicht nicht zwingend notwendig, mehrmals am Tag ein neues Bild von den Wäldern um Seattle zu erhalten und zu interpretieren.

§ 49 Daher könnte man für einen Waldbrandsatelliten ein anderes Verfahren der Datenverarbeitung vorsehen: die Datenverarbeitung an Bord des Satelliten soll ein Feuer automatisch erkennen, z.B. durch Vergleich der Aufnahmen mit einer gespeicherten Karte und/oder

¹²Bei ausgedehnten Wäldern in unbewohnten Gebieten reden wir allerdings nicht über 1 km mal 1 km große Parzellen sondern eher über Gebiete mit Kantenlängen von einigen 10 km, d.h. selbst ein Auflösungsvermögen von 1 km wäre noch hilfreich.

den Aufnahmen der Vortage. Das Auslösen von Feueralarm erfolgt, wenn in einem oder mehreren Bildpunkten ein vorher fest gelegter Helligkeitswert überschritten wurde. Die Datenübertragung würde dann wie folgt aussehen: kein Anzeichen für ein Feuer, so wird ein kurzes ok übertragen (sonst weist die Bodenstation nicht, ob der Satellit kein Feuer gesehen hat oder ob es technische Probleme gibt) und die Bodenstation fordert das Bild nur bei Bedarf an. Findet sich ein Anzeichen für Feuer, so wird ein Alarm ausgelöst und das Bild übertragen. Auf Grund des Alarms weist die Bodenstation auch, dass dieses Bild mit hoher Priorität genauer zu untersuchen ist und nicht nur eine Routineaufnahme darstellt. Durch eine derartige teil-automatisierte Vorverarbeitung wird also nicht nur die zu übertragende Datenmenge relativ klein gehalten sondern auch die Aufmerksamkeit der Beobachter am Boden auf den entscheidenden Datensatz gelenkt.

§ 50 Was in dieser Einleitung ein Planspiel war, wird aktuell am Beispiel von EMBERSat [145] diskutiert – wenn auch mit anderen Prioritäten als von uns in den voran gegangenen Abschnitten identifiziert. Und die Disaster Monitoring Constellation DMC [329, 723] ist in diesem Bereich natürlich ebenfalls aktiv.

1.4 Aufbau der Vorlesung

§ 51 Mit Hilfe des voran gegangenen Beispiels haben wir die wesentlichen Anforderungen an das Design einer Satellitenmission definiert:

- die Bahn, die (mit den Eigenschaften des Instruments) die Wiederholfrequenz und das Bodenaufklärungsvermögen bestimmt,
- die Auswahl und Spezifizierung des primären Satelliteninstruments,
- Auswahl und Spezifizierung ergänzender Instrumente,
- die Datentransmission, sowie
- die teil-automatisierte Datenverarbeitung (an Bord oder am Boden) zur Identifikation.

Das Skript folgt in seinem Aufbau dieser Anforderungsliste.

§ 52 In Kapitel 2 werden wir Satellitenbahnen diskutieren. Dazu gehören die aus den Kepler'schen Gesetzen bestimmten elementaren Bahnen, Kreisbahn oder Ellipse, ebenso wie kompliziertere Bahnen wie das scheinbare Ruhen eines Satelliten im Lagrange-Punkt auf der Verbindungsachse Sonne–Erde oder das für Missionen zu anderen Planeten wichtige planetare Billard. Beispiele für typische Satellitenbahnen werden ebenso vorgestellt wie Bahnstörungen und ihre Ursachen. Dabei werden wir lernen, dass einige der Bahnstörungen nicht nur negative Auswirkungen haben sondern auch zur Erzeugung bestimmter Bahnen verwendet werden können; frei nach dem Motto 'its not a bug – its a feature'. Wir werden kurz auch das Einbringen des Satelliten in seine Bahn diskutieren und seine Stabilisierung in der Bahn. Letztere ist für die Ausrichtung der Instrumente wichtig – was nützt das genialste Instrument mit der Fähigkeit, das Kleingedruckte auf einem Handy-Vertrag aus 300 km Flughöhe lesen zu können, wenn der zugehörige Satellit wie ein Betrunkener durch die Gegend torkelt oder sich langsam um seine, aber nicht die Kamera-Achse dreht.

§ 53 In Kapitel 3 werden Beispiele für typische Instrumente auf Erdfernerkundungssatelliten vorgestellt. Dabei werden auch ältere Instrumente genauer diskutiert:

- sie sind einfach, so dass sich die physikalischen Grundlagen gut verstehen lassen – dass Messprinzip ist bei modernen Instrumenten noch immer das gleiche, schließlich ändert sich die Physik nicht schnell genug;
- sie bilden das Rückgrat für alle Untersuchungen zum global change und werden zur Erzeugung einer kontinuierlichen Datenbasis teilweise heute noch nachgebaut bzw. am Leben erhalten;
- sie sind Universalinstrumente und nicht wie z.B. der Coastal Zone Color Scanner CZCS auf eine sehr spezielle Fragestellung optimiert;

- die meisten modernen Instrumente sind eher eine Weiterentwicklung dieser klassischen Instrumente als Neuentwicklungen, d.h. die Grundlagen haben sich nicht geändert, lediglich einige technische Details.

Auch einige moderne, state-of-the-art Instrumente werden beschrieben.

§ 54 Kapitel 4 stellt sehr kurz einige Satellitenfamilien bzw. Missionen vor: auf unseren Wettersatelliten beziehen wir uns immer als MeteoSat – z.Z. sind wir allerdings bereits bei MeteoSat 8 und dieser unterscheidet sich von seinen Vorgängern nicht unerheblich. Außerdem werfen wir einen kurzen Blick auf die Umweltsatelliten: EnviSat der ESA und das Earth Observing System EOS (früher Mission to Planet Earth) der NASA mit seinen verschiedenen Satelliten wie Terra, Aqua, CloudSat usw.

§ 55 In Kapitel 5 werden wir einen kurzen Blick auf andere Aspekte von Umweltforschung und die Erforschung der weiteren Umwelt werfen. Dazu gehören insbesondere die zur Untersuchung der Solar–terrestrischen Beziehungen erforderlichen Messungen von Solarkonstante, Albedo und Plasma im Erdumfeld wie die für die vergleichende Atmosphärenforschung wichtigen Untersuchungen an anderen Planeten bzw. deren Monden.

§ 56 Bisher haben wir Erdfernerkundung eher unter dem messtechnischen Aspekt betrachtet. Wie bei einer Labormessung müssen die Daten aber auch ausgewertet werden. Bevor wir uns mit einigen Aspekten der Datenaufbereitung, insbesondere der Bildverarbeitung, in Kapitel 7 beschäftigen können, müssen wir einen Aspekt des remote sensing betrachten, der bei einer Labormessung nicht in dieser Form auftritt: die Kommunikation über hunderte oder Tausende von Kilometern entlang gestörter Kommunikationskanäle. Dazu werden wir uns in Kapitel 6 mit den Grundlagen der Kommunikation beschäftigen, insbesondere mit der Quellencodierung zur Verminderung der Redundanz und mit der Kanalcodierung, d.h. dem Zufügen von Redundanz um eine Fehlererkennung und -korrektur zu ermöglichen. In Kapitel 6 werden wir einen kurzen Ausflug in die Bildbearbeitung vornehmen. In beiden Kapiteln werden uns Bekannte aus der täglichen Arbeit mit dem Computer begegnen, wie z.B. der Lempel-Ziv-Algorithmus als Grundlage von ZIP und der Bildkompression in GIF und PNG oder JPEG als Verlust behaftetes Bildformat.

§ 57 Fragen und Aufgaben finden sich in allen Kapiteln (außer 4), Musterlösungen für einen Teil der Aufgaben finden Sie im Anhang.

§ 58 Literatur ist ebenfalls am Ende jedes Kapitels angegeben – und natürlich auch im Text selbst. Wirklich empfehlenswert als Begleitung für die gesamte Vorlesung ist der Sabins [209] als ausführliches, mit vielen Beispielen versehenes Werk, und Cracknell und Hayes [41] als kompaktes Bändchen. Die NASA stellt ferner ein Online-Tutorial zur Erdfernerkundung zur Verfügung [607], das viele (auch militärische oder von Flugzeugen gemachte) Beispielaufnahmen enthält. Das Tutorial verweist auch auf weitere online-Ressourcen. Ein einfaches Übersichtstutorial wird auch vom Canadian Center for Remote Sensing zur Verfügung gestellt [34].

§ 59 Ein weiteres gutes Hilfsmittel ist CEOS Earth Observation Handbook [276]: es enthält u.a. eine aktuelle Liste nahezu aller ziviler Satelliten (inkl. Orbit Informationen, Start und Missionsende oder geplante Start) sowie eine Liste der Instrumente – mit Hyperlinks. Auch JAXA stellt unter [386] viele Informationen über Satelliten, Instrumente und Messprinzipien zur Verfügung. Und alle möglichen bunten Bilder gibt es unter [619] – wenn auch mit etwas ungleichmäßiger geographischer Verteilung. Satellitendaten und global change werden ausführlich in Verbindung gebracht in [82] und [128].

Kapitel 2

Satellitenbahnen

Gib mir Schiffe oder richtige Segel für die Himmelsluftfahrt her und es werden auch Menschen da sein, die sich vor den entsetzlichen Weiten nicht fürchten.

Kepler an Galilei, in [731]

§ 60 In diesem Kapitel werden die Grundlagen der Bahnmechanik besprochen. Dazu gehört die Bewegung eines Testkörpers im Schwerfeld eines wesentlich massiveren Körpers und die sich daraus ergebenden grundlegenden Bahnen, die durch Kegelschnitte beschrieben werden (Abschn. 2.2). Für die Erdfernerkundung sind von diesen Bahnen nur die geschlossenen Bahnen, d.h. Kreis- und Ellipsenbahnen, interessant. Beispiele für typische Bahnen von Erdsatelliten, insbesondere im Hinblick auf Flughöhe und Inklination, werden diskutiert (Abschn. 2.4).

§ 61 Dabei gehen wir von einer für die Erdfernerkundung vielleicht nicht ganz realistischen Annahme aus: Satellit und Erde sind beide Punktmassen. Aus Sicht insbesondere eines Spionagesatelliten sollte die Erde aber weniger ein auf maximal ein Pixel abzubildender Punkt als vielmehr ein auf Tausende von Pixeln abzubildender ausgedehnter Gegenstand sein. Auch aus bahnmechanischer Sicht ist die Erde zumindest für Flughöhen im Bereich einiger hundert bis weniger tausend Kilometer alles andere als eine Punktmasse. Inhomogenitäten im Schwerfeld der Erde führen daher zu Störungen der Satellitenbahn. Diese Störungen lassen sich zum gezielten Anpassen von Bahnen verwenden, z.B. zur Erzeugung sonnensynchroner Bahnen.

§ 62 In Abschn. 2.7 werden neben diesen typischen Bahnen auch spezielle Bahnen diskutiert, die weniger für die Erdfernerkundung als vielmehr für die Erforschung des Planetensystems von Bedeutung sind: das scheinbare Verharren eines Satelliten im Lagrange-Punkt auf der Verbindungslinie Erde–Sonne und das u.a. von den Voyager und Pioneer Raumsonden durchgeführte interplanetare Billard, bei dem die Sonden im Gravitationsfeld eines Planeten in Richtung auf den nächsten Planeten abgelenkt werden.

2.1 Historisches: ein Apfel fällt um die Erde

§ 63 Die Historie startet mit einer guten Näherung: einem ruhenden Zentralkörper (Sonne im Planetensystem, Erde bei Satellitenbewegungen) und einem bewegten Satelliten; letzterer wird im Fall des Zentralkörpers Sonne auch als Planet bezeichnet. Die Flugbahn eines Satelliten um einen Planeten ist, ebenso wie die Bahn eines Planeten um ein Zentralgestirn, durch die Anziehungskraft zwischen den beiden Körpern sowie die Bahngeschwindigkeit des Satelliten/Planetens bestimmt.

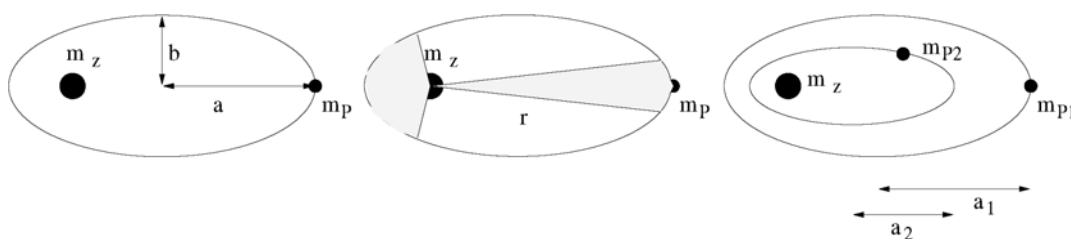


Abbildung 2.1: Kepler'sche Gesetze

§ 64 Die Beschreibung antriebsloser Satellitenbahnen erfolgt mit Hilfe der Kepler'schen Gesetze:¹

1. Die Planeten bewegen sich auf elliptischen Bahnen in deren einem Brennpunkt die Sonne steht.²
2. Die Radiusvektoren von der Sonne zu den Planeten überstreichen in gleichen Zeiten gleiche Flächen (Flächensatz).
3. Die dritten Potenzen der großen Halbachsen a sind proportional zu den Quadraten der Umlaufzeiten, d.h.

$$\frac{T^2}{a^3} = c_k$$

mit c_k als einer für alle Planeten eines Sonnensystems gleichen Konstante.

Anschaulich sind die Kepler'schen Gesetze in Abb. 2.1 dargestellt.

§ 65 Zur Anwendung der Kepler'schen Gesetze auf Satelliten ist jeweils das Wort Planet durch Satellit zu ersetzen und Sonne bzw. Zentralgestirn durch Planet.

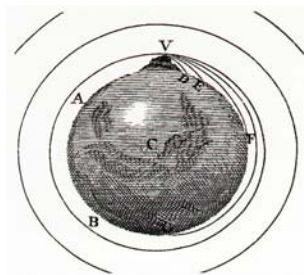
Zwischenrechnung 1 Wenn das dritte Kepler'sche Gesetz für alle Satelliten gilt: überprüfen Sie, ob es auch für den Mond gilt.

§ 66 Die Kepler'schen Gesetze sind empirisch, d.h. sie beruhen auf Beobachtungen und sind nicht aus grundlegenden Prinzipien abgeleitet. Erst Newton gelang das Verständnis dieser Gesetze in dem er erkannte, dass das von ihm gefundene Gravitationsgesetz nicht nur den Fall eines Apfels auf der Erde beschreibt sondern ebenso auch die Bewegung eines Planeten um die Sonne: der Apfel fällt nicht auf die Erde sondern um diese herum.³ Da ein Planet, so Newton's

¹Kepler veröffentlichte seine ersten beiden Gesetze 1609 in *Astronomia nova de motibus stellae Martis*, das dritte nach weiteren Beobachtungen und einer verfeinerten Datenanalyse zehn Jahre später in *Harmonices mundi libri V*.

²Das erste Kepler'sche Gesetz beinhaltet, dass die Bahnen der Planeten geschlossene Bahnen sind. Das ist nicht trivial, eine alternative Form der Bewegung mit nicht geschlossenen Bahnen wären Präzessionsorbits.

³Newton veröffentlichte diese Betrachtungen zuerst 1687 in den *Principia*. Dort gibt er auch eine anschauliche Erklärung: beim waagerechten Wurf hängt die Flugweite von der horizontalen Geschwindigkeit des Körpers ab; mit zunehmender Abwurfgeschwindigkeit wächst die Flugweite. Wird der Körper sehr schnell geworfen, so wird seine Flugweite so groß, dass die Erdkrümmung nicht mehr vernachlässigt werden kann. Eine Kreisbahn entsteht dann, wenn sich die Erde während einer Zeiteinheit des Fluges um genau das Stückchen unter dem Körper krümmt, um dass er in dieser Zeiteinheit in Richtung auf das Zentrum gefallen ist:



Argumentation, sich nicht auf einer gradlinigen Bahn bewegt, muss gemäß Trägheitsgesetz eine Kraft auf ihn wirken. Diese ist die Gravitationskraft des Zentralkörpers, gegeben als

$$\vec{F} = -\gamma \frac{M_Z m_p}{r^2} \vec{e}_r \quad (2.1)$$

mit M_Z und m_p als den Massen von Zentralkörper und Planet, r als deren Abstand, \vec{e}_r als dem Einheitsvektor entlang der Verbindungsachse zwischen den beiden (mit dem Zentralkörper als Ausgangspunkt) sowie $\gamma = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ als der universellen Gravitationskonstante.

§ 67 Unter der Annahme einer Kreisbewegung lässt sich die Bahngeschwindigkeit des Planeten einfach herleiten, da die Zentralkraft die Gravitationskraft ist, d.h. es

$$\frac{m_p v_K^2}{r} = \gamma \frac{M_Z m_p}{r^2} \quad \rightarrow \quad v_K^2 = \frac{\gamma M_Z}{r} . \quad (2.2)$$

Diese Kreisbahngeschwindigkeit, auch als erste kosmische Geschwindigkeit bezeichnet, ist eine ausgezeichnete Geschwindigkeit: sie ist die niedrigste Geschwindigkeit, mit der sich ein Körper auf einer Umlaufbahn um den Zentralkörper halten kann. Für einen Körper auf der Erde beträgt die erste kosmische Geschwindigkeit 7.9 km/s oder 28 440 km/h.

§ 68 Auch eine Ellipsenbahn lässt sich mit Newtons Apfelanalogie zumindest plausibel machen. Stellen wir uns dazu vor, dass der Körper mit einer Horizontalgeschwindigkeit größer als der ersten kosmischen Geschwindigkeit geworfen wird. Dann ist die Fallstrecke während einer Zeiteinheit die gleiche wie bei der Kreisbahn; die dabei zurück gelegte horizontale Strecke jedoch größer, d.h. der Körper entfernt sich vom Zentralkörper, r wird also größer. Mit zunehmendem r wird auch die potentielle Energie des Körpers größer. Da die Bewegung nach dem Abwurf antriebslos erfolgt, muss die kinetische Energie des Körpers abnehmen und damit auch seine Geschwindigkeit. Ist die Gesamtenergie W_{ges} des Körpers beim Start größer als seine potentielle Energie $W_{p,\infty}$ im Unendlichen, so entweicht der Körper aus dem Schwerfeld des Zentralkörpers. Für den Fall $W_{\text{ges}} < W_{p,\infty}$ wird so lange kinetische Energie in potentielle Energie des Körpers umgewandelt, wie seine Geschwindigkeit die Kreisbahngeschwindigkeit bei seinem momentanen Abstand übersteigt. Wird dieser Punkt überschritten, so fällt der Körper pro Zeiteinheit eine größere Strecke als sich die lokale Kreisbahn unter ihm wegkrümmt, d.h. der Körper bewegt sich unter Umwandlung von potentieller in kinetische Energie auf den Zentralkörper zu.

§ 69 Mit dieser anschaulichen Betrachtung können wir zwar keine Ellipsenbahnen begründen (die Betrachtung zeigt nicht, dass die Bahnen geschlossen sind), aber der Flächensatz wird plausibel: große Abstände sind mit geringen Geschwindigkeiten verbunden, kleine Abstände mit großen.

§ 70 Das dritte Kepler'sche Gesetz lässt sich auf anschauliche Weise zumindest plausibel machen. Auf einer Kreisbahn (als Spezialfall der Ellipse) gilt in jedem Punkt der Bahn (2.2). Ersetzt man die Geschwindigkeit v_K durch den Quotienten aus Umfang $2\pi r$ der Kreisbahn und Umlaufzeit T , so ergibt (2.2) eine Konstante:

$$\frac{r^3}{T^2} = \frac{\gamma M_Z}{(2\pi)^2} .$$

2.2 Physikalische Grundlagen

§ 71 Streng genommen ist die obige Betrachtung aus zwei Gründen nur eine Näherung:

- Planeten- und Satellitenbahnen sind durch die gegenseitige Anziehung zwischen den beteiligten Körpern bestimmt. Daher ist die Idee des ruhenden Zentralkörpers nur im Rahmen des eingeschränkten Zweikörperproblems (Abschn. 2.2.1) korrekt.
- selbst im Rahmen des eingeschränkten Zweikörperproblems ist diese Betrachtung vereinfacht; so wird z.B. eine Planetenbahn um ein Zentralgestirn durch die anderen Planeten gestört, eine Satellitenbahn kann durch den Einfluss des Mondes gestört werden. In diesem Fall lässt sich die Bewegung nicht mehr auf ein Zweikörperproblem reduzieren.

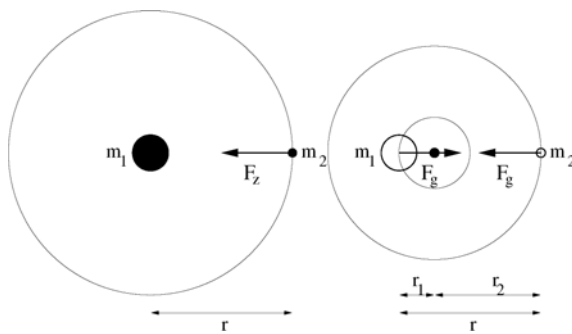


Abbildung 2.2: Bewegung um den gemeinsamen Schwerpunkt

2.2.1 Eingeschränktes Zweikörperproblem

§ 72 Aber selbst bei Beschränkung auf zwei Körper müssen wir die Beschreibung genauer hinterfragen. Betrachten wir dazu zwei Körper gleicher Masse m , die sich im Schwerfeld des jeweils anderen Körpers bewegen. Dann ist es nicht möglich zu sagen, dass der eine Körper ruht und der andere sich im Schwerfeld des ersten auf einer Kreisbahn um diesen bewegt. Stattdessen bewegen sich beide Körper um den gemeinsamen Massenmittelpunkt.

§ 73 Da bei Planeten- und Satellitenbewegungen der eine Körper wesentlich massereicher ist als der andere, liegt der gemeinsame Schwerpunkt sehr dicht an bzw. in der Regel im massenreicheren Körper und die anschauliche Darstellung der Bewegung eines Körpers um den anderen ist angemessen.

§ 74 Betrachten wir dazu zwei Massen m_1 und m_2 an den Orten \vec{r}_1 und \vec{r}_2 . Ihr Massenmittelpunkt befindet sich am Ort \vec{r}_{MM} , d.h. da kein Drehmoment wirkt muss gelten $m_1(\vec{r}_1 - \vec{r}_{\text{MM}}) + m_2(\vec{r}_2 - \vec{r}_{\text{MM}}) = 0$. Mit $\vec{r} = \vec{r}_1 - \vec{r}_2$ als dem die beiden Massen verbindenden Vektor ergibt sich für die Abstände der Massen vom gemeinsamen Schwerpunkt

$$\vec{r}_1 - \vec{r}_{\text{MM}} = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \vec{r} \quad \text{und} \quad \vec{r}_2 - \vec{r}_{\text{MM}} = -\frac{m_1}{m_1 + m_2} \vec{r}.$$

Zwischenrechnung 2 Schätzen Sie mit Hilfe der Größen in Abschn. 8.2 ab, wo der Massenmittelpunkt in den Systemen Sonne–Erde, Erde–Mond, Erde–MeteoSat und Erde–EnviSat liegt.

§ 75 Mit \vec{F}_1 als der von m_2 auf m_1 ausgeübten Kraft und entsprechend \vec{F}_2 als der auf m_2 wirkenden Kraft ergibt sich

$$\vec{F}_1 = m_1 \ddot{\vec{r}}_1 = m_1 \ddot{\vec{r}}_{\text{MM}} + \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \ddot{\vec{r}} \quad \text{und} \quad \vec{F}_2 = m_2 \ddot{\vec{r}}_2 = m_2 \ddot{\vec{r}}_{\text{MM}} - \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \ddot{\vec{r}}. \quad (2.3)$$

Da die Kräfte entgegen gesetzt gleich sind, $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$, ergibt sich daraus $m_1 \ddot{\vec{r}}_{\text{MM}} = -m_2 \ddot{\vec{r}}_{\text{MM}}$ und damit für allgemeine Massen

$$\ddot{\vec{r}}_{\text{MM}} = 0,$$

d.h. der Massenmittelpunkt des Zweikörpersystems wird nicht beschleunigt sondern befindet sich im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen Bewegung.

§ 76 Damit reduziert sich (2.3) auf

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2 = m_2 \ddot{\vec{r}}_2 = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \ddot{\vec{r}}. \quad (2.4)$$

Einsetzen der Gravitationskraft (2.1) liefert

$$\ddot{\vec{r}} = -\frac{\gamma(m_1 + m_2)}{r^3} \vec{r} = -\frac{\mu}{r^2} \vec{e}_r. \quad (2.5)$$

Formal ist diese Bewegungsgleichung äquivalent zu der sich bei Verwendung der Gravitationskraft (2.1) ergebenden, allerdings wird die Masse des Zentralkörpers ersetzt durch die

Summe μ der Massen der beiden Körper. Für einen Planeten und sein Zentralgestirn bzw. einen Satelliten und seinen Planeten ist die Gesamtmasse μ jedoch praktisch mit der des Zentralkörpers identisch,⁴ so dass die vereinfachende Vorstellung, dass der Satellit vom Planeten angezogen und auf seine Umlaufbahn gezwungen wird, für praktische Anwendungen ausreichend ist.

2.2.2 Satellitenbahnen und Erhaltungsgrößen

§ 77 Die formale Herleitung von Planeten- bzw. Satellitenbahnen finden Sie in Lehrbüchern zur theoretischen Physik, z.B. [73, 79], oder in Büchern zur Bahn- bzw. Himmelsmechanik, z.B. [17, 26, 210, 213]. An dieser Stelle wird nur der generelle Weg der Herleitung skizziert, um den Zusammenhang zwischen Eigenschaften der Bahn und den Erhaltungsgrößen noch einmal zu rekapitulieren – schließlich sind das die Größen, auf die wir auch bei der argumentativen Behandlung von Bahnen und Bahnstörungen zurück greifen.

Energieerhaltung (1. Integral der Bewegung)

§ 78 Aus der Bewegungsgleichung (2.5) lässt sich durch Multiplikation mit $2\dot{\vec{r}}$ das Energieintegral herleiten. Aus $2\dot{\vec{r}}\ddot{\vec{r}} = -2\mu/r^3 \dot{\vec{r}}\vec{r}$ lässt sich durch Zusammenfassen des Produkts aus einer Größe und ihrer Ableitung die Ableitung der quadrierten Größe⁵ bilden, d.h. wir erhalten $\dot{v}^2 = -\mu/r^3 (\dot{r})^2$. Integration liefert das Energieintegral

$$v^2 - \frac{2\mu}{r} = h_c \quad (2.6)$$

mit h_c als der auch als Energiekonstante bezeichneten Integrationskonstanten. Diese ist mit den Anfangswerten v_0 und r_0 verknüpft gemäß $h_c = v_0^2 - 2\mu/r_0$; sie ist der Gesamtenergie E_0 proportional: $E_0 = \frac{1}{2}mh_c$.

Momentintegral (Drehimpulserhaltung)

§ 79 Das Momentintegral, und damit der Flächensatz, lässt sich durch vektorielle Multiplikation der Bewegungsgleichung (2.5) mit \vec{r} herleiten:

$$\vec{r} \times \ddot{\vec{r}} = -\frac{\mu}{r^3} \vec{r} \times \vec{r}. \quad (2.7)$$

Die rechte Seite der Gleichung verschwindet. Dann ist auch $\vec{r} \times \ddot{\vec{r}} = 0$, d.h. die Kraft ist eine Zentralkraft und die Bewegung erfolgt in einer Ebene. Gleichung (2.7) lässt sich unter Berücksichtigung der Kettenregel schreiben als $d(\vec{r} \times \dot{\vec{v}})/dt = 0$. Integration liefert das Momentintegral (Drehimpulserhaltung)

$$\vec{r} \times \dot{\vec{v}} = \vec{\sigma}_c \quad (2.8)$$

mit $\vec{\sigma}_c$ als einer Integrationskonstante.

§ 80 Skalare Multiplikation mit \vec{r} liefert die Gleichung der Bahnebene

$$\vec{r}\vec{\sigma}_c = 0, \quad (2.9)$$

d.h. σ_c steht senkrecht auf der Bahnebene.

⁴Die Masse der Sonne ist um mehr als 5 Größenordnungen größer als die der Erde, vgl. Abschn. 8.2, die Masse der Erde ist um ca. 21 Größenordnungen größer als die eines großen Erdfernerkundungssatelliten.

⁵Dies können Sie durch Anwendung der Kettenregel auf das Ergebnis leicht einsehen. Das Produkt $2\dot{\vec{r}}\ddot{\vec{r}}$ lässt sich schreiben als \dot{v}^2 , da gilt $\dot{v}^2 = 2\dot{\vec{v}}\dot{\vec{v}} = 2\dot{\vec{r}}\ddot{\vec{r}}$.

Flächensatz

§ 81 Aus der Gleichung der Bahnebene (2.9) lässt sich der Flächensatz durch Übergang auf Polarkoordinaten herleiten. Fällt in kartesischen Koordinaten die Bahnebene in die $z = 0$ -Ebene, so ist $\vec{\sigma}_c = (0, 0, \sigma_c)$ und das Momentintegral (2.8) reduziert sich auf $xy - yx = 0$. Einsetzen von $(x, y) = r(\cos \varphi, \sin \varphi)$ liefert den Flächensatz $r^2 \dot{\varphi} = \sigma_c = \text{const.}$ Mit dem Flächenelement $dA = \frac{1}{2} r^2 d\varphi$ erhalten wir

$$A = \frac{\sigma_c}{2} (t_2 - t_1) , \quad (2.10)$$

d.h. der Ortsvektor überstreicht in gleichen Zeitintervallen $t_2 - t_1$ gleiche Flächen A .

Laplace-Integral

§ 82 Vektorielle Multiplikation der Bewegungsgleichung (2.5) mit dem Momentintegral (2.8) liefert

$$\vec{\sigma}_c \times \ddot{\vec{r}} = -\frac{\mu}{r^3} (\vec{r} \times \vec{v}) \times \vec{r} = -\frac{\mu}{r^3} [\vec{v} (\vec{r} \cdot \vec{r}) - \vec{r} \cdot (\vec{r} \vec{v})] .$$

Mit $\vec{r} \cdot \vec{r} = r^2$ und $\vec{r} \cdot \vec{v} + \vec{v} \cdot \vec{r} = 2vr$ ergibt sich $\vec{r} \cdot \vec{v} = rv$ und damit

$$\vec{\sigma}_c \times \ddot{\vec{r}} = -\frac{\mu}{r^3} (r^2 \vec{v} - rv \vec{r}) = -\mu \frac{r \vec{v} - v \vec{r}}{r^2} = -\mu \frac{d}{dt} \left(\frac{\vec{r}}{r} \right)$$

bzw.

$$\frac{d}{dt} (\vec{\sigma}_c \times \vec{r}) - \mu \frac{d}{dt} \left(\frac{\vec{r}}{r} \right) = 0 .$$

Integration liefert das Laplace-Integral

$$\vec{\sigma}_c + \vec{v} + \mu \frac{\vec{r}}{r} = \vec{\lambda}_c \quad (2.11)$$

mit $\vec{\lambda}_c$ als Integrationskonstante.

§ 83 Skalare Multiplikation von (2.11) mit $\vec{\sigma}_c$ liefert $\vec{\sigma}_c \cdot \vec{\lambda}_c = 0$, d.h. der Laplace-Vektor $\vec{\lambda}_c$ liegt in der Bahnebene.

§ 84 Da die Bewegungsgleichung als vektorielle DGL 2^{ter} Ordnung sechs Integrationskonstanten benötigt, wir aber mit den bisher bestimmten h_c , $\vec{\sigma}_c$ und λ_c sieben haben, können letztere nicht linear unabhängig sein. Die Beziehung zwischen ihnen lässt sich durch Quadrieren des Laplace-Integral bestimmen zu

$$\lambda_c^2 = \mu^2 + h_c \sigma_c^2 . \quad (2.12)$$

Bahngleichung

§ 85 Die Bahngleichung lässt sich durch skalare Multiplikation des Laplace-Integrals (2.11) mit \vec{r} bestimmen:

$$\vec{r} \cdot (\vec{\sigma}_c + \vec{v}) + \mu \frac{\vec{r} \cdot \vec{r}}{r} = -\vec{\lambda}_c \cdot \vec{r} . \quad (2.13)$$

Anwendung des Momentintegrals (2.8) und zyklisches Vertauschen der Vektoren im Spatprodukt liefert $-\sigma_c^2 + \mu r = -\lambda_c r \cos \tau$ mit τ als dem Winkel zwischen dem Ortsvektor \vec{r} und dem Laplace-Vektor $\vec{\lambda}_c$. Auflösen nach r gibt die Gleichung der Satellitenbahn

$$r = \frac{p}{1 + \varepsilon \cos \tau} \quad (2.14)$$

mit dem Bahnparameter p und der Exzentrizität ε gemäß

$$p = \frac{\sigma_c^2}{\mu} > 0 \quad \text{und} \quad \varepsilon = \frac{\lambda_c}{\mu} > 0 . \quad (2.15)$$

Tabelle 2.1: Kegelschnitte

	Kreis	Ellipse	Parabel	Hyperbel
Exzentrizität ε	0	$0 < \varepsilon < 1$	1	> 1
Bahnparameter p	a	$a(1 - \varepsilon^2)$	p	$a(\varepsilon^2 - 1)$
Große Halbachse a	a	a	–	a
Kleine Halbachse b	a	$a\sqrt{1 - \varepsilon^2}$	–	$a\sqrt{\varepsilon^2 - 1}$
Perigäum r_P	a	$a(1 - \varepsilon)$	$\frac{1}{2}p = q$	$a(\varepsilon - 1)$
Apogäum r_A	a	$a(1 + \varepsilon)$	∞	∞

Kegelschnitte

§ 86 Die Bahngleichung (2.14) beschreibt Kegelschnitte, wobei die Exzentrizität (2.15) die Art des Kegelschnitts gibt (vgl. auch Tabelle 2.1):

$0 \leq \varepsilon < 1$: der Nenner in der Bahngleichung (2.14) ist immer von Null verschieden, so dass sich eine geschlossene, im endlichen verlaufende Ellipsenbahn ergibt.

$\varepsilon = 1$: der Nenner der Bahngleichung (2.14) verschwindet für $\tau = \pi$, d.h. die Bahn hat einen Punkt im Unendlichen (Parabel).

$\varepsilon > 1$: der Nenner der Bahngleichung (2.14) verschwindet für zwei Werte, d.h. die Bahn hat zwei Punkte im Unendlichen (Hyperbel).

Die realisierte Bahn hängt von den Anfangsbedingungen ab. Einsetzen der Beziehung (2.12) in die Definition (2.15) liefert

$$\varepsilon = \sqrt{1 + h_c \frac{\sigma_c^2}{\mu^2}}$$

mit der Energiekonstanten h_c gemäß (2.6) bzw. bei Verwendung der Anfangsbedingungen $h_c = v_0^2 - 2\mu/r_0$.

§ 87 Bei der Ellipsenbahn ist $\varepsilon < 1$ und damit $h_c < 0$, d.h. die Bahn ist eine gebundene. Die elliptische Anfangsgeschwindigkeit wird damit zu $v_0^2 < 2\mu/r_0$. Entsprechend ergibt sich mit $\varepsilon = 1$ und damit $h_c = 0$ die parabolische Anfangsgeschwindigkeit zu $v_0^2 = 2\mu/r_0$. Eine hyperbolische Anfangsgeschwindigkeit ergibt sich für $\varepsilon > 1$ und damit $h_c = -\mu^2/\sigma^2$ zu $v_0^2 = 2\mu/r_0 - \mu^2/\sigma_c^2$.

§ 88 Ein Spezialfall der Ellipsenbahn ist die Kreisbahn mit $\varepsilon = 0$ und damit $\sigma_c^2 = p\mu$ mit $p = r_0$ und $v_0 = \text{const.}$ Die Kreisbahngeschwindigkeit oder erste kosmische Geschwindigkeit ist dann $v_k^2 = \mu/r$. Sie ist gerade ausreichend damit ein Satellit um einen sphärischen Himmelskörper entlang eines Großkreises fliegen kann.⁶ Für die Erde ist $v_k = 7.9$ km/s.

2.2.3 Ellipsenbahnen

§ 89 Planeten und Satelliten bewegen sich in der Regel auf Ellipsenbahnen oder deren Spezialfall, der Kreisbahn. Eine Ellipse wird durch ihre große und kleine Halbachse, a und b , beschrieben, vgl. Abb. 2.3. Im Spezialfall des Kreises ist $a = b = r$. Die Punkte A und P markieren das Apo- und das Perizentrum, d.h. den Punkt der Bahn am weitesten vom Zentralkörper entfernt bzw. diesem am nächsten. Bei der Erde werden diese als Apogäum und Perigäum bezeichnet, bei der Sonne als Aphel und Perihel. Die Abstände dieser Punkte vom Zentralkörper sind durch die Exzentrizität ε und den Bahnparameter p bestimmt:

$$r_P = \frac{p}{1 + \varepsilon} \quad \text{und} \quad r_A = \frac{p}{1 - \varepsilon}.$$

Die Achse zwischen Apo- und Perizentrum wird als Apsidenlinie bezeichnet.

⁶Ein Großkreis ist ein Kreis auf einer Kugel, bei dem der Kugelmittelpunkt in der Kreisebene liegt. Die Äquatorebene der Erde wäre ein Beispiel, ebenso alle Kreisbahnen entlang eines festen Längengrades. Entsprechend ist die Bahn entlang des 50^{ten} Breitengrades keine Großkreisbahn, da die Bahnebene nicht durch den Erdmittelpunkt geht – als antriebslose Satellitenbahn wäre eine derartige Bahn nicht realisierbar (also doch kein billiger geostationärer Satellit über Moskau).

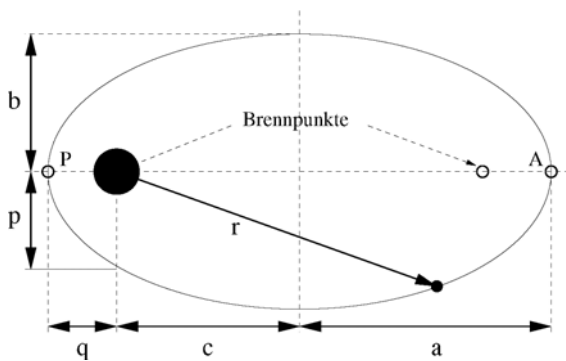


Abbildung 2.3: Kenngrößen einer elliptischen Bahn

Energetik

§ 90 Die Geschwindigkeit in verschiedenen Punkten der Bahn lässt sich aus dem Energiesatz (2.6) bestimmen. Die Energiekonstante h_c kann in irgendeinem Punkt der Bahn bestimmt werden, also auch im Perigäum. Dort stehen Orts- und Geschwindigkeitsvektor senkrecht auf einander und es gilt

$$|\vec{v}_P| = r_P \left(\frac{d\eta}{dt} \right)_P$$

mit der wahren Anomalie η als dem Winkel zwischen dem Ortsvektor und der Apsidenlinie. Gemäß Flächensatz (2.10) ist $|\sigma_c| = r^2\dot{\eta}$ und wir erhalten für die Energiekonstante im Perigäum

$$h_c = \frac{1}{2} \frac{\sigma_c^2}{r_P^2} - \frac{\mu}{r_P} = \frac{\mu}{2r_P^2} (p - 2r_P),$$

wobei im letzten Schritt die linke Seite von (2.15) verwendet wurde.

§ 91 Setzt man die entsprechenden Werte aus Tabelle 2.1 ein, so erhalten wir für die Gesamtenergie der Ellipsenbahn

$$h = -\frac{\mu}{2a}, \quad (2.16)$$

für die Parabel $h = 0$ und für die Hyperbel $h = \mu/(2a)$, d.h. die Gesamtenergie hängt nur ab von der großen Halbachse a und der Masse μ des Zentralgestirns (plus Satellit/Planet). Die Exzentrizität der Bahn hat keinen Einfluss auf die Energie, d.h. ein Satellit auf einer sehr exzentrischen Bahn hat die gleiche Gesamtenergie wie einer auf einer die Ellipse umschreibenden Kreisbahn.

Verständnisfrage 1 Ist die Aussage sinnvoll? Im Apogäum ist der Ellipse ist die Geschwindigkeit und damit die kinetische Energie kleiner als bei der Kreisbahn – bei gleicher potentieller Energie?

§ 92 Für die Geschwindigkeit entlang der Bahn ergibt sich nach Einsetzen der Gesamtenergie in die Energiegleichung (2.6) die Binet'sche Gleichung

$$v = \sqrt{\mu \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)}. \quad (2.17)$$

Beim Kreis ist $a = r$ und es ergibt sich wieder die erste kosmische Geschwindigkeit

$$v_1 = \sqrt{\frac{\mu}{r}} = v_k.$$

Für eine Parabel ($a = \infty$) ergibt sich die zweite kosmische Geschwindigkeit zu

$$v_2 = \sqrt{\frac{2\mu}{r}} = \sqrt{2} v_k.$$

Tabelle 2.2: Flugbahnen bei verschiedenen Abschussgeschwindigkeiten im Perigäum

v [km/s]	v/v_k	v/v_p	a [km]	ε	D [km]
2	0.25	0.18	3 290	0.94	200
4	0.51	0.36	3 650	0.74	920
6	0.76	0.54	4 480	0.42	2 580
7.91	1.00	0.707	6 378	0.00	6 378
8	1.01	0.71	6 500	0.02	6 620
9	1.14	0.80	9 010	0.34	11 640
10	1.26	0.89	15 740	0.60	25 100
11.0	1.391	0.984	99 500	0.94	192 600
11.10	1.403	0.9924	221 000	0.97	435 000
11.185	1.414	1.000	∞	1.00	∞

Tabelle 2.3: Bahnparameter als Funktion der großen Halbachse

a [km]	a/R	H [km]	T [min]	n [°/min]	v_k [km/s]
6 378	1.0000	7	84.49	4.261	7.91
6 400	1.0034	29	84.92	4.239	7.89
6 500	1.0191	129	86.92	4.142	7.83
6 600	1.0348	229	88.94	4.048	7.77
6 700	1.0505	329	90.97	3.958	7.71
6 800	1.0661	429	93.01	3.871	7.66
6 900	1.0818	529	95.07	3.787	7.60
7 000	1.0975	629	97.15	3.706	7.55
7 200	1.1288	829	101.34	3.552	7.44
7 400	1.1602	1 029	105.58	3.410	7.34
7 600	1.1916	1 229	109.89	3.276	7.24
7 800	1.2229	1 429	114.26	3.151	7.15
8 000	1.2542	1 629	118.69	3.033	7.06
9 000	1.4111	2 629	141.62	2.542	6.65
10 000	1.5678	3 629	165.64	2.174	6.31
15 000	2.3518	8 630	5 ^h 4 ^m 43 ^s	1.814	5.15
20 000	3.1357	13 630	7 ^h 49 ^m 8 ^s	0.7674	4.47
42 160	6.611	35 790	23 ^h 56 ^m 4 ^s	0.2507	3.07
384 400	60.266	–	27 ^d 7 ^h 43 ^m	0.00915	1.02

Diese Geschwindigkeit ist notwendig, um aus dem Schwerefeld des Zentralkörpers zu entweichen. Für die Erde beträgt diese Fluchtgeschwindigkeit 11.2 km/s, die Fluchtgeschwindigkeit aus dem Sonnensystem beträgt 16.7 km/s.

§ 93 Mit Hilfe der Binet'schen Gleichung (2.17) ergibt sich für die Geschwindigkeiten in Apo- und Perizentrum der Bahn

$$v_A = \sqrt{\frac{\mu}{a} \frac{1 - \varepsilon}{1 + \varepsilon}} \quad \text{und} \quad v_P = \sqrt{\frac{\mu}{a} \frac{1 + \varepsilon}{1 - \varepsilon}}.$$

Die Geschwindigkeiten im Peri- und Apozentrum hängen also nicht nur von der großen Halbachse der Ellipse sondern auch von der Exzentrizität ab: je größer die Exzentrizität, um so größer die Unterschiede in den Geschwindigkeiten. Ein Molniya-Satellit z.B. fliegt auf einer elliptischen Bahn mit $\varepsilon = 0.75$ und hat damit im Perigäum eine um einen Faktor 7 höhere Geschwindigkeit als im Apogäum.

§ 94 Tabelle 2.2 gibt einen Überblick über die sich in Abhängigkeit von der Abschussgeschwindigkeit im Perigäum ergebenden Bahnen (das entspricht der Abwurfgeschwindigkeit auf Newton's Berg). Die Geschwindigkeiten sind auch in Einheiten der Kreisbahngeschwindigkeit v_k und der parabolischen Geschwindigkeit v_p gegeben. Außerdem sind angegeben die Bahnparameter große Halbachse a und Exzentrizität ε sowie die maximale Entfernung D vom Startpunkt. Die horizontalen Linien markieren jeweils den Übergang zur Kreisbahn bzw. unten die Annäherung an die parabolische Bahn.

§ 95 Tabelle 2.3 gibt die Bahnparameter als Funktion der großen Halbachse. Die unteren beiden Bahnen entsprechen der geostationären Bahn und der Mondbahn, die Bahnen zwischen den beiden horizontalen Linien sind typisch für Erdfernerkundungssatelliten. Angegeben sind neben der großen Halbachse a die große Halbachse in Einheiten des Erdradius, a/R , die mittlere Flughöhe H über dem Erdboden, die Umlaufzeit T , die mittlere Winkelgeschwindigkeit sowie die Kreisbahngeschwindigkeit. Auf diese Tabelle werden wir im Laufe der weiteren Diskussion noch häufiger zurück greifen.

Lage der Bahn im Raum

§ 96 Bisher haben wir die Ellipsenbahn mit ihren Parametern große und kleine Halbachse, a und b , Exzentrizität ε und Bahnparameter p zur Beschreibung der Bahn eingeführt. Um die Bewegung eines Satelliten zu beschreiben, benötigen wir zusätzliche Parameter, insbesondere die Lage der Bahn im Raum.

§ 97 Der wichtigste Bahnparameter ist die Inklination i , d.h. die Neigung der Bahnebene gegenüber der Äquatorebene. Damit können z.B. wir zwischen äquatorialen Bahnen ($i = 0$) und polaren Bahnen ($i = 90^\circ$) unterscheiden – während erstere für Wettersatelliten oder zum Studium der tropischen Ozeane sicherlich gut geeignet sind, eignen sich letztere eher zum Studium des (ant)arktischen Ozonlochs. Nicht-geostationäre Fernerkundungssatelliten wie LandSat, SPOT oder POES haben eine nahezu polare Bahn: dadurch kann (nahezu) die gesamte Erdoberfläche abgescannt werden. Ganz polar, d.h. $i = 90^\circ$, ist die Bahn jedoch nicht, da die Vorteile einer sonnensynchronen Bahn die Nachteile des nicht direkt erfolgenden Polüberfluges ausgleicht.

§ 98 Die Untergrenze des Werts der Inklination ist, falls der Satellit nicht nach Einbringen in seine Bahn manövriert wird, durch die geographische Breite seines Startorts bestimmt: von Kiruna lässt sich kein Satellit in eine Bahn mit einer Inklination von weniger als 68° einschiesen, der Einschuss in eine polare Bahn dagegen ist möglich. Daher versucht man, Raketenstartplätze in möglichst niedriger geographischer Breite zu betreiben: Kourou, der Startplatz der ESA, liegt bei N5 W52. Fehlt einem eine geeigneter Startplatz, so sind entweder aufwändige Manöver oder spezielle Tricks erforderlich, z.B. das hochgradig elliptische Orbit der Molniya Satelliten.

§ 99 Der zweite Parameter zur Beschreibung der Lage der Bahnebene ist die Rektaszension Ω . Sie gibt die Lage der Knotenlinie der beiden Ebene im Bezug auf die Richtung des Frühjahrspunkts an, wobei der aufsteigende Punkt dieser Linie in der Richtung zeigt, in der der Satellit den Äquator von Nord nach Süd überquert. Oder pragmatischer: die Rektaszension legt fest, zu welcher Tageszeit ein Satellit den Äquator bei einer bestimmten geographischen Länge südwärts fliegend überquert. Bei eine sonnensynchronen Bahn ist dieser Wert konstant, d.h. der Äquator wird stets zur gleichen Tageszeit überflogen.

§ 100 Jetzt sind die Bahn und die Lage der Bahnebene festgelegt, zusätzlich muss noch die Lage der Bahn in der Bahnebene bestimmt werden durch den Winkel ω zwischen der Knotenlinie und der Apsidenlinie. Zur Festlegung der genauen Bewegung benötigen wir einen sechsten Parameter, der angibt, wo auf der Bahn sich der Satellit zu einem bestimmten Zeitpunkt (Epoche) befunden hat. Dafür eignen sich die Zeiten von Perigäums- oder Knotendurchgängen. Die Parameter sind in Abb. 2.4 zusammen gefasst.

§ 101 Dass diese große Zahl von Parametern zur Beschreibung der Bahn nicht nur von akademischem Interesse ist, wird in Abb. 2.17 deutlich: die Bahn eines typischen POES Satelliten ist einfach. Es handelt sich um eine nahezu polare sonnensynchrone Kreisbahn in einer Höhe von ca. 850 km. Mehrere POES Satelliten fliegen jeweils gleichzeitig in zu einander versetzten Orbits. Für die Interpretation der Daten ist jedoch eine zusätzliche Information unerlässlich: die Lokalzeit, zu der die Satelliten den Äquator auf- oder absteigend kreuzen.

§ 102 Einige Spezialfälle für Bahnen sind:

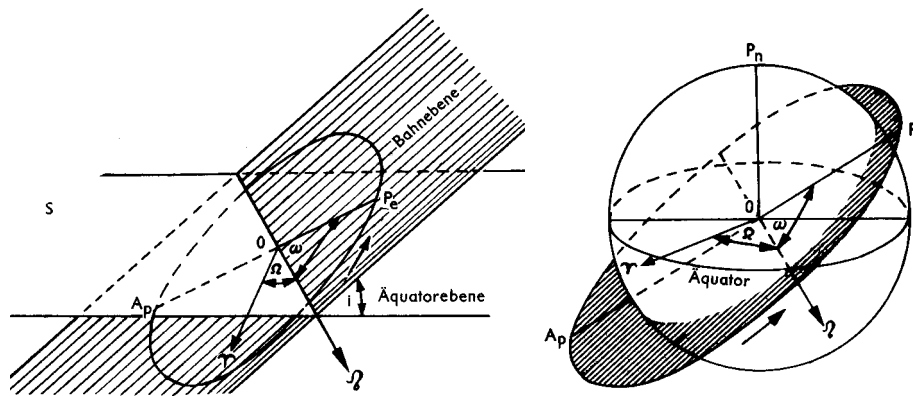


Abbildung 2.4: Festlegung der Bahnebene und -ellipse eines Satelliten gegenüber der Äquatorebene und dem Frühlingspunkt [26]

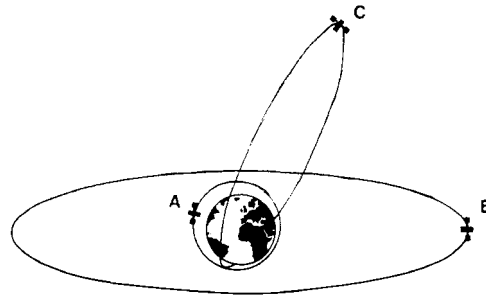


Abbildung 2.5: Beispiele für Satellitenbahnen [264]

- äquatoriale Bahnen, d.h. die Inklination verschwindet, $i = 0$,
- polare Bahnen mit einer Inklination nahe 90° ,
- stark exzentrische Bahnen mit $\varepsilon > 0.1$ werden für einige Kommunikationssatelliten verwendet,
- geostationäre Bahnen mit $\varepsilon = 0$, $i = 0$ und $T = 24$ h,
- sonnensynchrone Bahnen in denen die Bahnebene des Satelliten so ausgerichtet ist, dass sie stets in einem festen Winkel zur Erde-Sonne-Achse steht. Diese Bahn ist der Standard für Erdfernerkundungssatelliten – zumindest wenn sie ein Imaging-Instrument tragen.

§ 103 Abbildung 2.5 fasst schematisch einige spezielle Bahnen zusammen: (A) gibt eine polare Kreisbahn in niedriger Höhe, wie sie zur Erderkundung und -überwachung und zur militärischen Aufklärung verwendet wird. (B) zeigt eine äquatoriale Kreisbahn in großer Höhe, z.B. eine geostationäre Bahn für Wetter- und Kommunikationssatelliten. (C) gibt eine stark exzentrische Bahn mit relativ großer Inklination wie sie z.B. von den Molniya-Kommunikationssatelliten genutzt wird. Wir werden in Abschn. 2.4 genauer auf diese speziellen Orbits eingehen.

2.3 Bahnstörungen

§ 104 Die Bahnellipse lässt sich unter der Annahme eines zentralen Massenpunktes, der von einer Testmasse umkreist wird, herleiten. Die Annahme eines Massenpunktes für den Zentralkörper enthebt diesen aller Störeinflüsse wie einer Atmosphäre oder eines nicht punktsymmetrischen Gravitationsfeldes. Aus der Sicht eines Fernerkundungssatelliten soll die Erde jedoch gerade nicht als Punktmasse erscheinen sondern als ausgedehnter Körper, dessen Eigenschaften es zu studieren gilt. Daher wird ein Fernerkundungssatellit genau mit diesen Eigenschaften konfrontiert. Auch wenn die Grundidee der Ellipsenbahn weiterhin gilt, müssen

wir Korrekturen vornehmen.

§ **105** Bisher haben wir Satellitenbahnen als antriebslose Bahnen ausschließlich unter dem Einfluss der Gravitationskraft betrachtet. In diesem Abschnitt werden wir auf einige Störungen von Satellitenbahnen eingehen und insbesondere auf die Umstände, unter denen diese auftreten. Wir werden auch lernen, dass Bahnstörungen nicht immer etwas Negatives sein müssen sondern auch positiv angewendet werden können – ja die Störungen selbst können Ziel der Untersuchung werden, z.B. wenn man die Abbremsung eines Satelliten in der Hochatmosphäre zur Messung der dortigen Temperatur verwendet. Das ist remote sensing mittels eines eigentlich für ein anderes remote sensing entwickelten Objektes.

§ **106** Formal werden die Einflüsse aller Störgrößen im Rahmen der Störungsrechnung behandelt. Ziel ist die Beschreibung der durch die Störgrößen bewirkten Änderung der Bahnparameter a , ε , ω , i und Ω in Abhängigkeit von der Zeit. In der Störungsrechnung werden die auf den Satelliten wirkenden Kräfte zerlegt in eine systematische Kraft auf Grund des Schwerefeldes der Erde und eine Störbeschleunigung \vec{a}_S . Damit ergibt sich für die Bewegungsgleichung

$$\ddot{\vec{r}} = -\mu \frac{\vec{r}}{r^3} + \vec{a}_S .$$

Die Störbeschleunigung wird in drei Komponenten zerlegt, eine radiale Störbeschleunigung a_r , eine senkrecht zum Ortsvektor \vec{r} wirkende Beschleunigung a_s in der Bahnebene, und eine Störbeschleunigung a_ω senkrecht zur Bahnebene. Die Komponenten a_r und a_s wirken auf die Bahnparameter a , ε und ω , d.h. die Bahnellipse verändert sich innerhalb der Bahnebene und die Apsidenlinie dreht sich gegebenenfalls. Die Beschleunigungen a_r und a_s werden z.B. durch Reibung und Erdabplattung verursacht. Die Störbeschleunigung a_ω dagegen wirkt auf i und Ω , Ursache ist z.B. die Erdabplattung. Sie bewirkt eine Änderung der Bahnebene.

§ **107** Bei allen Störungen wird zusätzlich zwischen periodischen Störungen und sekulären unterschieden. Letztere erfolgen zeitlich stets gleichsinnig.

2.3.1 Übersicht

§ **108** Formal werden Bahnstörungen in der Bewegungsgleichung derart berücksichtigt, dass zusätzlich zur Gravitationskraft eine Störkraft \vec{F}_S eingeführt wird und die erweiterte Bewegungsgleichung gelöst wird. Einige dieser Kräfte sind in Tabelle 2.4 zusammen gefasst. Zusätzlich enthält die Tabelle die sich aus diesen Kräften ergebenden Störbeschleunigungen für einen Satelliten in einem geostationären Orbit, also einen typischen Kommunikations- oder Wettersatelliten, und für den Laser Geodetic Satellite LAGEOS [503, 532, 533]⁷, einen Geodäsie-Satelliten auf einer Flughöhe von ca. 12 000 km.

§ **109** Die Störbeschleunigungen lassen sich klassifizieren in (a) gravitative Effekte (1–3 in Tabelle 2.4), (b) Reibung in der Atmosphäre (5), (c) Strahlungsdruck (6,7), (d) Sonnenwind, (e) thermische Emission (8), (f) zufällige Einflüsse, sowie (g) atmosphärische Gezeiten.

Gravitative Einflüsse

§ **110** Gravitative Einflüsse haben eine Vielzahl von Ursachen. Als erste ist die Ungenauigkeit in der Bestimmung der Gravitationskonstanten γ zu nennen. Diese Störung ist allerdings von

⁷In den Worten der NASA [532] lässt sich LAGEOS wie folgt charakterisieren: “LAGEOS (Laser Geodetic Satellite) was a very dense (high mass-to-area ratio) laser retroreflector satellite which provided a permanent reference point in a very stable orbit for such precision earth-dynamics measurements as crustal motions, regional strains, fault motions, polar motion and earth-rotation variations, solid earth tides, and other kinematic and dynamic parameters associated with earthquake assessment and alleviation.” Auf Grund des hohen Masse zu Fläche Verhältnisses einerseits und der immer noch recht hohen Flugbahn andererseits sind die in Tab. 2.4 gegebenen Größen für die Störbeschleunigungen immer noch recht klein im Vergleich zu denen, mit denen ein typischer Erdsatellit in einem niedrigen Orbit zu kämpfen hat. Dass LAGEOS minimalistisch ist, wird auch aus Abb. 2.6 deutlich.

Accelerations of spacecraft in earth orbit. The estimates and the relative uncertainties are given for a typical geosynchronous satellite and LAGEOS. M , R and J_m are the mass, the radius and the geopotential coefficients of the earth; r is the average satellite-earth distance; the subscripts m , \odot and v refer to the moon, the sun and Venus; S/m , C_D and V are the satellite's area-to-mass ratio, drag coefficient and velocity relative to the atmosphere (of density ρ); Φ is the solar constant; A the earth's albedo; α and $\Delta T/T$ are the satellite's absorption coefficient and the fractional temperature difference between parts of its surface.

Origin of acceleration	Formula	Parameters (in CGS units)	Relative uncertainty in the parameters	Geosynchronous satellite in cm/s^2		LAGEOS in cm/s^2	
				Acceleration	Uncertainty	Acceleration	Uncertainty
1. Earth's monopole	GM/r^2	$GM = 3.986 \cdot 10^{20}$	$5 \cdot 10^{-9}$	22	$2 \cdot 10^{-7}$	280	$3 \cdot 10^{-6}$
2. Earth's oblateness	$\frac{3GM R^2}{r^4} J_{20}$	$J_{20} = 4.84 \cdot 10^{-4}$ $R = 6.378 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^{-7}$	$7.4 \cdot 10^{-4}$	$4.5 \cdot 10^{-10}$	0.1	$6 \cdot 10^{-8}$
2. Low-order geopotential harmonics ($\ell = m = 2$)	$\frac{3GM R^2}{r^4} J_{22}$	$J_{22} = 2.81 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4.3 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-9}$	$6.0 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-7}$
2. <i>Ibidem</i> , ($\ell = m = 6$)	$\frac{7GM R^6}{r^7} J_{66}$	$J_{66} = 2.36 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-3}$	$4.4 \cdot 10^{-10}$	$3 \cdot 10^{-12}$	$8.6 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-8}$
2. High-order geopotential harmonics ($\ell = m = 18$)	$\frac{19GM R^{18}}{r^{20}} J_{1818}$	$J_{1818} = 7 \cdot 10^{-9}$	0.3	negligible	negligible	$2.7 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-10}$
3. Perturbations due to the Moon	$\frac{2GM_m r}{r_m^3}$	$GM_m = GM/81.3$ $r_m \approx 3.8 \cdot 10^{10}$	10^{-5} 10^{-9}	$7.3 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-9}$	$2.1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-9}$
3. Perturbations due to the Sun	$\frac{2GM_\odot r}{r_\odot^3}$	$GM_\odot = 3.33 \cdot 10^6 GM$ $r_\odot \approx 1.5 \cdot 10^{13}$	$3 \cdot 10^{-8}$ 10^{-8}	$3.3 \cdot 10^{-4}$	negligible	$9.6 \cdot 10^{-5}$	negligible
3. Perturbations due to other planets (e.g., Venus)	$\frac{2GM_v r}{r_v^3}$	$GM_v = 0.82 \cdot GM$ $r_v \geq 4 \cdot 10^{12}$	10^{-4} 10^{-7}	$4.3 \cdot 10^{-8}$	negligible	$1.3 \cdot 10^{-8}$	negligible
4. General relativistic corrections	$\frac{GM}{c^2 r} \frac{GM}{r}$	$\frac{GM}{c^2} = 0.44$	$5 \cdot 10^{-9}$	$2.3 \cdot 10^{-9}$	negligible	$9.5 \cdot 10^{-8}$	negligible
5. Atmospheric drag $V =$ volume, $S =$ surface	$C_D \frac{S}{2m} \rho V^2$	$C_D = 2-4$ $\rho = \rho(r)$	1	negligible	negligible	$3 \cdot 10^{-10}$	$3 \cdot 10^{-10}$
6. Solar radiation pressure	$\frac{S}{m} \frac{\Phi}{c}$	$\Phi = 1.38 \cdot 10^6$	$S: 0.01-0.3$ $\Phi: 0.001$	$4.6 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-7}$	$3.2 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{-9}$
7. Radiation pressure due to the albedo of the Earth A	$\frac{S}{m} \frac{\Phi}{c} \left(\frac{R}{r}\right)^2 A$	$A \approx 0.4$	Opt. coeff.: $0.01-0.1$ $A: 0.1-1$ $S: 0.01-0.3$	$4.2 \cdot 10^{-8}$	10^{-8}	$3.4 \cdot 10^{-8}$	$8 \cdot 10^{-9}$
8. Recoil from thermal emission	$\frac{4S}{m} \frac{\Phi}{c} \alpha \frac{\Delta T}{T}$	$\alpha \approx 0.1-0.7$ $T \approx 300 \text{ K}$ $\Delta T' \sim 1-20 \text{ K}$	0.01 0.1	$3 \cdot 10^{-8}$	$6 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-9}$

Tabelle 2.4: Auf einen Satelliten wirkende Kräfte [17]



Abbildung 2.6: LAGEOS 1 als kompakter Laserreflektor [436]

allen gravitativen Einflüssen die Unbedeutendste: damit ist ihr Wert zwar nicht kleiner als der der anderen Störbeschleunigungen, sie wirkt jedoch ausschließlich radial und bewirkt damit lediglich eine leichte Veränderung der großen Halbachse bzw. des Radius der Bahn.

§ 111 Einen größeren Einfluss (auch bezüglich des Wertes der Störbeschleunigung) hat die Abplattung der Erde. Die Erdaplattung hat einen größeren Einfluss auf niedrig fliegende Satelliten als auf solche in höheren Orbits – in letzterem Fall kommt die Erde der idealisierten Punktmasse bereits recht nahe, in ersterem dagegen erfährt der Satellit die Abweichungen von der Idealgestalt. Allerdings ist die Abplattung alleine immer noch keine gute Annäherung an das Geoid (siehe Abb. 3.70). Diese Kartoffel lässt sich mit Hilfe von Kugelflächenfunktionen (Legendre Polynom) annähern. Die Einflüsse der Störungen nehmen mit zunehmender Ordnung der Kugelflächenfunktion ab, siehe Tab. 2.4.

§ 112 Ein weiterer gravitativer Effekt sind die Einflüsse anderer Himmelskörper. Diese sind, abgesehen von der Anziehungskraft des Mondes auf hoch fliegende Satelliten, zu vernachlässigen. Die Gravitation dritter Körper ist jedoch für spezielle Bahnen, wie die Aufhängung von Satelliten im Lagrange-Punkt von Bedeutung und bei Bahnen eingefangener Körper (z.B. der Komet Levy-Shoemaker 9 im Schwerefeld des Jupiter [404, 745]; teilweise auch beim planetaren Billard [352, 756], siehe auch Abschn. 2.7.2).

Reibung in der Hochatmosphäre

§ 113 Die durch die Reibung in der Hochatmosphäre bewirkte Kraft ist um so größer, je niedriger das Orbit des Satelliten, da die Dichte der Atmosphäre mit zunehmender Höhe ungefähr exponentiell abnimmt. Außerdem hat das Verhältnis von Oberfläche zu Masse (also im wesentlichen das Verhältnis von Reibungs- zu Trägheitskraft) großen Einfluss: leichte und voluminöse Satelliten werden stärker abgebremst als kompakte Satelliten wie der bereits zitierte LAGEOS. Eine Abschätzung des Einfluss der Reibung ist insbesondere für sehr niedrig fliegende Satelliten schwierig, da sich die Eigenschaften der Hochatmosphäre in Abhängigkeit von der solaren Aktivität erheblich ändern können. Wie werden in Abschn. 2.3.2 genauer darauf eingehen.

Strahlungsdruck

§ 114 Hier muss zwischen dem direkten Strahlungsdruck durch die auf den Satelliten auftreffende solare Strahlung unterschieden werden und dem indirekten Strahlungsdruck, der durch von der Erde bzw. der Erdatmosphäre reflektierte solare Strahlung entsteht. Beide Effekte sind für normale Erdsatelliten unerheblich, sie spielen jedoch bei leichten und großen Satelliten (z.B. die Echo-Ballon-Satelliten⁸) eine nicht zu vernachlässigende Rolle.

⁸Echo [491, 402, 724] ist der erste Kommunikationssatellit der NASA mit einem bestechend einfachen Konzept: man nehmen einen mit einer Folie beschichteten Ballon mit einem Durchmesser von ca. 30 m. Wenn beim Start nicht zuviel Restluft enthalten war, entfaltet sich der Ballon im Orbit auf ca. 1600 km

Sonnenwind

§ 115 Der Sonnenwind (siehe auch Abschn. 3.1.2 und 5.3) ist ein ca. 1 Mio K heißes, kontinuierlich von der Sonne abströmendes Plasma mit einer Dichte von einigen Teilchen pro cm^3 . Da ein Plasma aus geladenen Teilchen besteht, wird es vom Erdmagnetfeld abgelenkt, d.h. der Sonnenwind gelangt nicht in die Erdmagnetosphäre (siehe Abschn. 3.1.2 und insbesondere Abb. 3.4). Letztere hat eine Ausdehnung von mindestens 10 Erdradien, d.h. der Sonnenwind beeinflusst nur Satelliten, die in extrem hohen und/oder sehr exzentrischen Orbits fliegen – und dann meist auch die Aufgabe haben, eben diesen Sonnenwind zu vermessen. Erdfernerkundungssatelliten kommen normalerweise nicht in den Einflussbereich des Sonnenwindes.⁹

Thermische Emission

§ 116 Die thermische Emission geschieht in Folge der Erwärmung des Satelliten durch die absorbierte solare Einstrahlung. Diese thermische Emission bewirkt auf Grund der Impulserhaltung einen Rückstoß auf den Satelliten. Diese Bahnstörung kann daher als die Umkehrung des Strahlungsdrucks angesehen werden. Der Einfluss dieser Störgröße hängt ab von der Geometrie des Satelliten, dem verwendeten Lagestabilisierungsverfahren und dem Auftreten und der Geometrie herausragender Merkmale wie Antennen und Sonnensegel. Als Faustregel gilt auch hier: der Satellit muss groß und leicht sein, damit diese Störgröße zu merkbareren Effekten führen kann. Moderne Satelliten (und insbesondere die Sonnensegel) werden zwar immer größer, aber auch immer schwerer. Das Verhältnis Oberfläche/Masse wird dabei eher kleiner.

Zufällige Einflüsse

§ 117 Zufällige Einflüsse umfassen z.B. Meteoriten als direkt auf den Satelliten wirkende Kräfte und solare Flares, die über eine Aufheizung und Ausdehnung der Hochatmosphäre zu einer verstärkten Satellitenabbremmung durch Reibung führen. Auf Grund ihrer zufälligen Natur lassen sich diese Störgrößen weder im Zeitpunkt oder der Rate des Auftretens noch in ihrer Größe klassifizieren. Ein mit der zunehmenden Nutzung des Weltraums auftretender weiterer zufälliger Effekt ist die Kollision mit Weltraumschrott [258, 259, 605, 759]. Dabei handelt es sich weniger um ausgediente Satelliten (die versucht man häufig aus den begehrten Orbits hinaus zu manövrieren) sondern viel mehr um ausgediente Raketenstufen und Kleinmüll von desintegrierten Raumfahrzeugen, z.B. falls diese gerade mit einer Anti-Satelliten-Waffe zusammengetroffen sind [693, 689] – was auch gelegentliche Ausweichmanöver erfordert [647, 673, 767], da die großen Relativgeschwindigkeiten auch kleine Müllfetzen zu (durch)schlagkräftigen Projektilen für Solarzellen oder die Fenster des Shuttle machen (Beispiele unter [606]). GEO stellte schon im Heft 3/1989 fest: “Weltraummüll: Raumpfleger dringend gesucht”.

Atmosphärische Gezeiten

§ 118 Atmosphärische Gezeiten sind ein Teilaspekt der Reibung in der Hochatmosphäre, d.h. sie wirken auf einen Satelliten in niedrigem Orbit stärker als auf einen hoch fliegenden. Sie werden als separater Effekt aufgeführt, da die atmosphärischen Gezeiten eine periodisch wirkende Störgröße bilden, so dass es im Gegensatz zur normalen Reibung unter Umständen zu einer Resonanz zwischen den Gezeiten und bestimmten Eigenschaften des Orbits kommen kann.

Höhe aufgrund des niedrigen Umgebungsdrucks ohne zu platzen automatisch. Und seine Metallfolie erlaubt die Reflektion von Radiowellen. Die Echo-Satelliten sind Musterbeispiele für passive Kommunikation.

⁹Eine Ausnahme bilden manchmal die geostationären Satelliten auf der der Sonne zugewandten Seite der Erde: starke Störungen im Sonnenwind (koronale Massenauswürfe und/oder Stoßwellen) können den Sonnenwinddruck auf die Magnetosphäre so stark erhöhen, dass diese an der Tagseite komprimiert wird (und sich an der Nachtseite mit Umstrukturierungen wehrt, deren sichtbare Folge Polarlichter sind). Die Kompression kann so stark sein, dass die Grenze der Magnetosphäre, die Magnetopause, dichter an die Erde rutscht als das geostationäre Orbit – der Satellit befindet sich plötzlich außerhalb der Magnetosphäre im Freien.

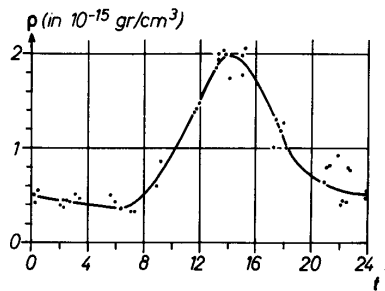


Abbildung 2.7: Tägliche Dichteveriation in einer Höhe von 560 km, geschlossen aus der Bahn von Vanguard 2 [127]

2.3.2 Reibung in der Hochatmosphäre

§ 119 Reibung in der Hochatmosphäre bewirkt eine Abbremsung des Satelliten und damit ein Absinken auf niedrigere Bahnen bis hin zum Absturz. Reibung ist aber nicht nur ein Störeffekt – die beobachtete Abbremsung eines Satelliten wird umgekehrt auch zur Messung der Temperatur¹⁰ bzw. Dichte der Hochatmosphäre verwendet. Aus Veränderungen der Satellitenbewegung hat man bereits früh die starke Variabilität der Hochatmosphäre erkannt. Also auch hier: ‘its not a bug – its a feature’. Reibung (bzw. genauer die Dichteschichtung der Atmosphäre) setzt auch eine Untergrenze für eine im Sinne von Langlebigkeit sinnvolle Flughöhe eines Erderkundungssatelliten – außer man möchte, wie früher die UdSSr, den Satelliten früh wieder zurück kriegen.

§ 120 Abbildung 2.7 zeigt als Beispiel die täglichen Dichteveriationen in einer Höhe von 560 km, wie sie aus den Bahnvariationen von Vanguard 2 hergeleitet wurden. In Übereinstimmung mit dem starken Tagesgang der Temperatur in der Hochatmosphäre, zwischen 600 und 1800 K je nach Tageszeit und solarer Aktivität, treten in der Dichte im Verlauf des Tages Variationen um bis zu einem Faktor 5 auf. Das Dichtemaximum tritt kurz nach 14 Uhr lokaler Zeit auf, d.h. kurz nach dem Maximum der solaren Einstrahlung. Diese Verzögerung erklärt sich durch Wärmeleitungsvorgänge in der Atmosphäre [12], eine ähnliche Verzögerung des Temperaturgangs ist uns auch aus der Troposphäre bekannt. Die Dichteveriation entlang eines Breitenkreises lässt sich auch als die Wanderung einer Gasglocke (diurnal bulge) beschreiben, die die Erde dem Sonnenstand folgend umkreist. Oder weniger geozentrisch formuliert: die Dichteglocke befindet sich ortsfest annähernd in solarer Richtung und die Erde dreht sich im Laufe des Tages einmal unter dieser Glocke hinweg.

§ 121 Zur Abschätzung des Einfluss der Reibung setzen wir die Gravitationskraft als Zentralkraft ein und erhalten mit m_S als der Masse des Satelliten und M_E als der Masse der Erde

$$\frac{m_S v^2}{r} = \gamma \frac{M_E m_S}{r^2}$$

und damit $\gamma M_E = v^2 r$. Damit lässt sich die kinetische Energie schreiben als

$$E_{\text{kin}} = \frac{m_S v^2}{2} = \frac{\gamma M_E m_S}{2r}.$$

Für die potentielle Energie gilt

$$E_{\text{pot}} = mg(r)r = \frac{\gamma M_E m_S}{r} \quad (2.18)$$

¹⁰Temperaturmessung in der Hochatmosphäre ist ein nicht-triviales Problem. Zwar sind die Temperaturen sehr hoch, etliche hundert bis zu 2000 K, jedoch ist die Dichte der Atmosphäre so gering, dass keine messbare Wärmemenge durch Stöße an einen Temperaturfühler übertragen werden kann. Daher entfallen konventionelle Temperaturmessverfahren. Auf Grund der geringen Dichte und der starken thermischen Emission des Erdbodens ist es auch nicht möglich, eine Effektivtemperatur über den emittierten Strahlungsstrom zu bestimmen. In der Hochatmosphäre lässt sich die Temperatur daher nur noch über die kinetische Energie der Teilchen definieren gemäß Boltzmann-Verteilung. Mit der mittleren Teilchengeschwindigkeit $\langle v \rangle$ ergibt sich für die Temperatur T : $m\langle v \rangle^2/2 = fk_B T/2$ mit f als der Zahl der Freiheitsgrade und k_B als der Boltzmann-Konstanten.

und damit $E_{\text{pot}} = 2E_{\text{kin}}$.

§ 122 Für die Reibungskraft machen wir einen Newton'schen Ansatz, d.h. die Reibungskraft ist proportional der Geschwindigkeit: $F_{\text{Reib}} = -Dv$. Die Proportionalitätskonstante D berücksichtigt:

- die Querschnittsfläche A des Satelliten: je größer A , um so mehr Teilchen können Impuls auf den Satelliten übertragen;
- die Dichte ρ der Atmosphäre: je größer ρ , um so mehr Teilchen können Impuls auf den Satelliten übertragen;
- die Geschwindigkeit v des Satelliten als ein Maß für die Größe des Impulsübertrags pro Stoß; und den
- Widerstandsbeiwert c_D , der die Form des Satelliten und damit die Effizienz des Impulsübertrags berücksichtigt.¹¹

Mit Av als dem Volumen, das pro Zeiteinheit vom Satelliten durchquert wird ist $Av\rho$ die Luftmasse, die den Satelliten pro Zeiteinheit trifft. Diese überträgt pro Zeiteinheit einen Impuls $(Av\rho)v$. Berücksichtigt man den Widerstandsbeiwert c_D , so ergibt sich für die verzögernde Kraft

$$F_{\text{Reib}} = -\frac{1}{2}c_D\rho Av^2. \quad (2.19)$$

Der Widerstandsbeiwert beträgt ca. 2 für inelastische und ca. 4 für elastische Stöße [26].

Verständnisfrage 2 Warum ist die Geschwindigkeit des Satelliten maßgeblich, warum nicht die Geschwindigkeit der Luftmoleküle? Welche der beiden Geschwindigkeiten ist größer? Oder müsste nicht eigentlich die Relativgeschwindigkeit zwischen Satellit und Luftmolekülen verwendet werden?

§ 123 Multiplikation von (2.19) mit v und Umschreiben der linken Seite ergibt für die Änderung der kinetischen Energie mit der Zeit

$$\dot{E}_{\text{kin}} = \frac{d}{dt} \left(\frac{m_S v^2}{2} \right) = -\frac{\rho A c_D v^3}{2}.$$

Die Rate der Änderung der Flughöhe eines Satelliten lässt sich aus der Rate der Änderung der kinetischen Energie abschätzen:

$$\frac{d}{dt} E_{\text{kin}} = \frac{d}{dr} E_{\text{kin}} \frac{dr}{dt}$$

bzw. nach Auflösen und Einsetzen von (2.19)

$$-\frac{dr}{dt} = \frac{\rho v A c_D r}{m_S}. \quad (2.20)$$

Zwischenrechnung 3 Für Numerik fans: verwenden Sie (2.20) mit $\rho(r)$ und $v(r)$ und bestimmen Sie $r(t)$ für Sputnik 1 (Durchmesser 58 cm, Flughöhe aus 96 min Umlaufzeit und Annahme einer Kreisbahn bestimmen, Masse 84 kg), EnviSat (Querschnittsfläche als Quadrat mit 5 m Seitenlänge, Masse von 8.2 t, 790 km Flughöhe) sowie einen Tiefflieger wie SMM (4 m Durchmesser, 510 km Ausgangsflughöhe und 2.3 t Masse).

§ 124 Da sich Umlaufzeiten oder -frequenzen genauer bestimmen lassen als Flughöhen, ist es sinnvoller, die Änderung der Umlaufzeit $T = 2\pi r/v$ zu betrachten. Unter Berücksichtigung von (2.18) ergibt sich für die Abhängigkeit der Umlaufzeit von der potentiellen Energie $T^2 = 4\pi^2 r^3 / (\gamma M_E)$ und damit nach Ableiten für die zeitliche Änderung der Umlaufzeit

$$2T \frac{dT}{dt} = \frac{4\pi^2 3r^2}{\gamma M_E} \frac{dr}{dt} \quad \Rightarrow \quad \frac{dT}{dt} = -\frac{3\pi A c_D r}{m_S} \rho. \quad (2.21)$$

¹¹Ja, das ist dieser auch als c_w -Wert oder Strömungswiderstandskoeffizient bezeichnete, auch im Autobau verwendete Wert; Beispiele finden sich in [762]. Der Widerstandsbeiwert lässt sich nur experimentell aus der Reibungskraft (2.19) bestimmen; analytische Verfahren gibt es nicht und numerische Simulationen sind sehr aufwendig.

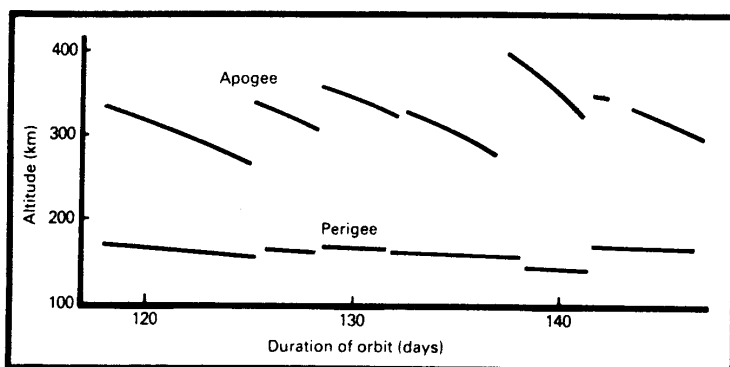


Abbildung 2.8: Einfluss des Luftwiderstands auf eine elliptische Satellitenbahn am Beispiel Kosmos 1097 [135]. Die Diskontinuitäten sind Folge von Bahnmanövern – bei der ISS muss auch immer mal wieder ein Kick gegeben werden [337, 768]

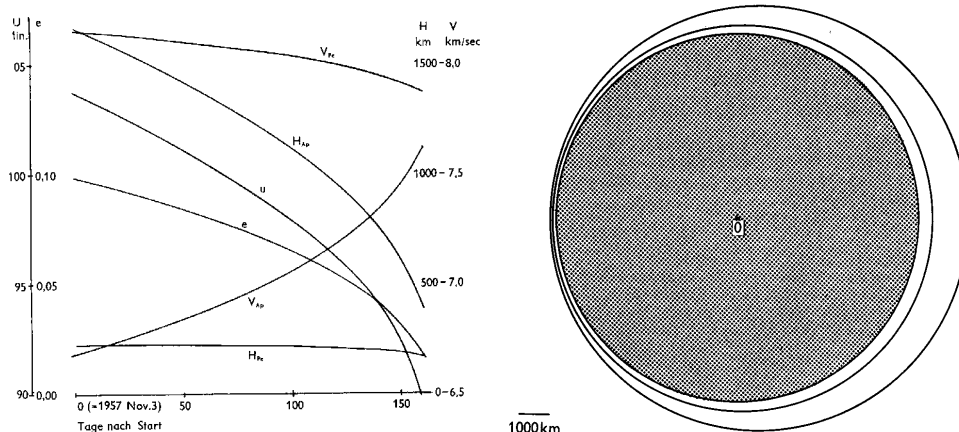


Abbildung 2.9: Änderung der Bahnparameter von Sputnik 2 in Folge des Luftwiderstands (links) und Anfangs- und Endbahn von Sputnik 2 (rechts) [26]

Die Änderung der Umlaufzeit eines Satelliten in einem kreisförmigen Orbit ist also direkt proportional der Dichte der umgebenden Atmosphäre. Die Bahnschrumpfung, d.h. die Verringerung der Umlaufhöhe bzw. Umlaufzeit, ist um so größer, je größer das Verhältnis aus Fläche A und Masse m_S des Satelliten ist. Große Satelliten geringer Masse werden daher stärker abgebremst als kompakte Satelliten.

Zwischenrechnung 4 Nochmals für Numeriker: rechnen Sie mit einer echten Ellipse statt des Kreises.

§ 125 Die Herleitung von (2.21) geht von einer Kreisbahn aus. Das ist sinnvoll, da gerade die niedrig fliegenden Späher sich auf nahezu kreisförmigen Orbits befinden. Bei einer elliptischen Bahn wirkt sich die Reibung im Detail etwas anders aus: die verzögernde Kraft ist im Perigäum größer als im Apogäum. Als Konsequenz verringert sich die kinetische Energie des Satelliten im Perigäum stärker als im Apogäum. Dadurch wird beim folgenden Apogäum eine deutlich geringere Höhe erreicht während die Perigäumshöhe nur geringfügig verringert wird. Als Konsequenz nimmt die Apogäumshöhe langsamer ab als die Perigäumshöhe. Dies ist am Beispiel des Satelliten Kosmos 1097 in Abb. 2.8 gezeigt. Die sprunghaften Anstiege in den Höhen ergeben sich durch Feuern der Booster, um den Satelliten auf eine höhere Umlaufbahn zu bringen und damit vor dem sofortigen Absturz zu bewahren.

§ 126 Die schnellere Abnahme der Apogäums- im Vergleich zur Perigäumshöhe bewirkt, dass die elliptische Bahn sich im Laufe der Zeit immer stärker einer Kreisbahn annähert. Kurz vor dem Absturz eines Satelliten geht die Exzentrizität sehr schnell gegen Null, so dass

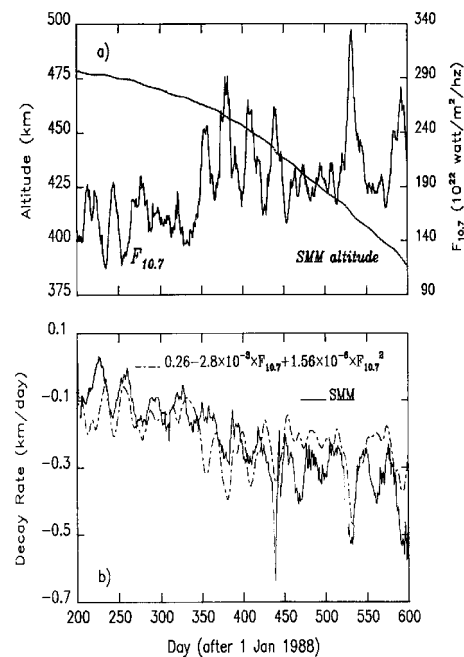


Abbildung 2.10: Abbremmung des SMM-Satelliten durch Zunahme solarer Aktivität [146]

man $\dot{\varepsilon}$ verwenden kann, um die Lebensdauer eines Satelliten abzuschätzen. Die Veränderung der Exzentrizität ε , der Umlaufzeit U , der Apogäum- und Perigäumshöhen H_{Ap} und H_{Pe} sowie der Geschwindigkeiten v_{Ap} und v_{Pe} in diesen Punkten sind in Abb. 2.9 für Sputnik 2 gezeigt.

§ 127 Die Lebenserwartung eines Satelliten, der nur noch eine Umlaufzeit von 88–89 min hat, ist gering. Die untere Grenze für T beträgt 87 min, entsprechend einer Höhe von ca. 150 km.

Absturz durch solare Aktivität: SMM

§ 128 Besonders stark ist die Satellitenabbremmung zu Zeiten hoher solarer Aktivität. Dann wird die Hochatmosphäre durch die harte elektromagnetische Strahlung stärker aufgeheizt und dehnt sich insgesamt aus. Dadurch werden dichtere Luftschichten in größere Höhen gehoben – oder aus der Sicht des Satelliten: die Dichte der Atmosphäre auf seiner Bahn nimmt zu und damit auch die Abbremsung. So sind des öfteren Satelliten durch erhöhte solare Aktivität abgestürzt bzw. schneller abgestürzt als geplant. Prominenteste Beispiele sind das Raum-Laboratorium SkyLab [482] und SolarMax¹² [493, 442, 490]; auch die MIR [736, 766] ist letztendlich von der Atmosphäre auf den Boden der Tatsachen zurück geholt worden.

§ 129 Abbildung 2.10 zeigt im oberen Teil die Flughöhe von SMM (Solar Maximum Mission, SolarMax, 1980–1989) zusammen mit der 10.7 GHz Radio-Strahlung der Sonne als einem Maß für die solare Aktivität und damit die Aufheizung der Hochatmosphäre. Letztere variiert mit der Rotation der Sonne, d.h. auf einer Zeitskala von ca. 27 Tagen. Im Laufe der Zeit steigt das allgemeine Niveau der Radiostrahlung an, gleichzeitig nimmt die Rate der Abnahme der Bahnhöhe von SMM zu. Dies allein ist noch kein Zeichen für eine Kopplung von Bahnhöhe und solarer Aktivität, da selbst bei konstanten Umgebungsbedingungen die Bahnhöhe mit zunehmender Zeit schneller abnimmt.

¹²SolarMax heißt eigentlich Solar Maximum Mission SMM und ist neben dem noch bekannteren, jetzt Brille tragenden Hubble Space Telescope einer der wenigen Satelliten, der jemals wieder vom Space Shuttle zu Reparaturzwecken eingefangen wurde [446].

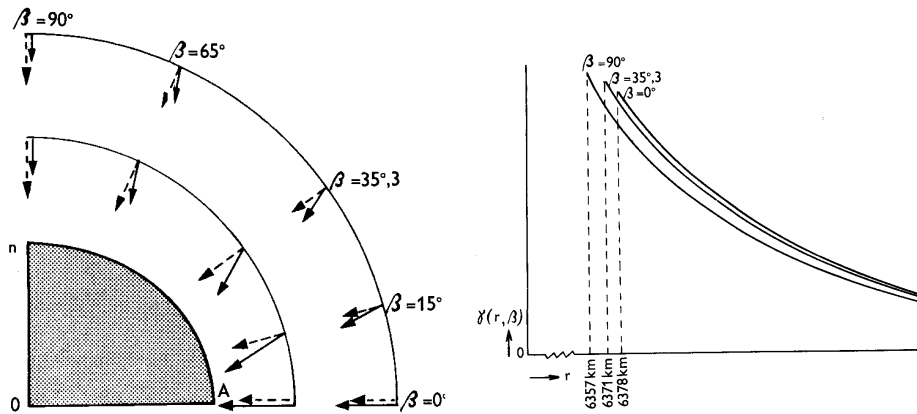


Abbildung 2.11: Abplattung der Erde: Richtung der Schwerkraftbeschleunigung (links) und Wert der Schwerkraftbeschleunigung für verschiedene Breiten in Abhängigkeit vom radialen Abstand (rechts) [26]

§ 130 Die direkte Kopplung wird in den Details des unteren Teilbildes von Abb. 2.10 deutlicher. Hier sind die Schwankungen im Radiofluss reziprok dargestellt und auf ein Äquivalent zur Änderungsrate der Bahnhöhe normiert (gestrichelte Kurve). Zusätzlich ist die Änderungsrate der Bahnhöhe aufgetragen (durchgezogene Linie). Man erkennt, dass die Änderung der Bahnhöhe dann besonders klein ist, wenn die reziproke Radioemission ein Maximum hat, d.h. wenn die solare Aktivität gering ist. Umgekehrt ist bei hoher solarer Aktivität die Änderungsrate der Satellitenhöhe groß, d.h. der Satellit verliert schnell an Höhe und stürzt letztendlich ab.

2.3.3 Bahnstörungen in Folge der Erdabplattung

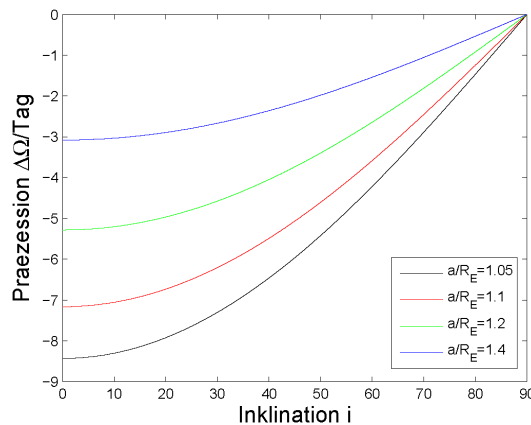
§ 131 Eine weitere Bahnstörung in niedrigen Orbits ist die Abplattung der Erde, in schematischer Form im linken Teil von Abb. 2.11 dargestellt. Die Abplattung bewirkt eine Abweichung der Richtung der Schwerkraftbeschleunigung von der Radialen, in übertriebener Form dargestellt durch die ausgezogenen Vektoren. Auf einen Satelliten im Orbit wirkt die Schwerkraftbeschleunigung daher nicht nur in radialer Richtung sondern hat auch eine tangentielle Komponente. Letztere führt zu einer Änderung der Geschwindigkeit entlang des Orbits: wird der Satellit verzögert, so verringert sich seine Flughöhe, im umgekehrten Fall erhöht sie sich. Die Abplattung der Erde beträgt mit $R_E = 6278.2$ km als dem äquatorialen Radius und P_E als dem Polarradius $(R_E - P_E)/R_E \approx 1/298.2$.

§ 132 Im rechten Teil von Abb. 2.11 ist die Gravitationsbeschleunigung als Funktion des Abstands für verschiedene Breiten β dargestellt. Zwei Effekte werden deutlich: für einen Satelliten in äquatorialer Bahn ist die Erdabplattung irrelevant, da er die Erde immer an der breitesten Stelle umkreist und somit die Schwerkraftbeschleunigung immer radial nach innen gerichtet ist, die Abplattung also keine Auswirkungen hat. Ferner sehen wir, dass mit zunehmendem radialen Abstand die durch die Abplattung bewirkte Änderung in Richtung und Betrag der Gravitationsbeschleunigung immer kleiner wird, da die Erde aus der Sicht eines Satelliten mit zunehmendem Abstand immer mehr zum Massenpunkt zusammen schmilzt. Für einen Erdfernerkundungssatelliten sind allerdings in der Regel weder die äquatoriale Bahn noch die Bahn in einem großen Abstand die Wunschoptionen.

§ 133 Für eine quantitative Abschätzung des Einflusses der Abplattung entwickeln wir das Gravitationspotential nach Multipolen [127]:

$$U = \frac{\mu}{r} \left[1 + \frac{1}{2r^2} \frac{C - A}{M_E} (1 - 3 \sin^2 \phi) \right] + \dots = \frac{\mu}{r} \left[1 + \frac{J}{3} \frac{R_E^2}{r^2} (1 - 3 \sin^2 \phi) \right] + \dots$$

Abbildung 2.12: Präzession der Bahnebene in Folge der Erdabplattung als Funktion der Inklination i und des mittleren Bahnabstands a/R_E



mit ϕ als Breite, C als Trägheitsmoment um die Rotationsachse (z -Achse) und A als Trägheitsmoment um eine senkrecht dazu stehende x -Achse sowie J als Quadrupolmoment mit

$$A = \int (z^2 + y^2) dm, \quad C = \int (x^2 + y^2) dm \quad \text{und} \quad J = \frac{3}{2} \frac{C - A}{R_E^2 M_E} \approx 1.6234 \cdot 10^{-3}.$$

Präzession

§ 134 Für die Satellitenbahn ergeben sich aus der Abplattung der Erde zwei Konsequenzen: (a) die Drehung der Bahnebene (Präzession) und (b) die Drehung der Bahnellipse (Apsidendrehung). Die Herleitungen zu beiden Prozessen finden Sie in [17, 197]. Die wesentlichen Ergebnisse für die Präzession der Bahn sind

$$\frac{\Delta\Omega}{\Delta T} = -2\pi J \left(\frac{R_E}{p} \right)^2 \cos^2 i \quad \text{bzw.} \quad \frac{\Delta\Omega}{\text{Tag}} = - \frac{10^\circ}{\left(\frac{a}{R_E} \right)^{7/2} (1 - \varepsilon^2)^2} \cos i. \quad (2.22)$$

Die Präzession hängt also wie erwartet von der Inklination i ab, siehe auch Abb. 2.12. Sie hängt ferner von der Exzentrizität ε der Bahn und der Flughöhe ab, hier gegeben durch die große Halbachse a/R_E in Einheiten des Erdradius.

Verständnisfrage 3 Anschaulich beeinflusst die Abplattung der Erde die äquatoriale Bahn nicht – formal ist die Präzession aber von Null verschieden. Woher der Widerspruch?

Verständnisfrage 4 Erklären Sie anschaulich, warum die Präzession für die exakt polare Bahn verschwindet. Was bedeutet das für sonnensynchrone Bahnen?

§ 135 Als Beispiel ergibt sich für Sputnik 2 mit $a/R_E = 1.13$, $\varepsilon = 0.09$ und $i = 65.3^\circ$ eine Drehung der Bahnebene von $2.77^\circ/\text{Tag}$; für Explorer 7 mit $a/R_E = 1.128$, $\varepsilon = 0.0377$ und $i = 50.3^\circ$ ergibt sich $\Delta\Omega = -4.27^\circ/\text{Tag}$. Das Vorzeichen der Bahndrehung sagt aus, ob die Bahn nach Ost oder West ausweicht – das Minuszeichen gilt für den Normalfall, dass die Bewegung des Satelliten in Ost–West-Richtung erfolgt.¹³ Für beide Satelliten waren die beobachteten Werte etwas geringer als die berechneten (Sputnik 2.72° , Explorer 4.21°). Diese Abweichungen zwischen beobachteter und berechneter Bahndrehung erlauben eine genauere Bestimmung von J .

Zwischenrechnung 5 Für eine echte polare Bahn ($i = 90^\circ$) ist gemäß (2.22) keine sonnensynchrone Bahn möglich, da die Präzession verschwindet. Bestimmen Sie realistische Kombinationen von i , a und ε für einen sonnensynchronen Erdfernerkundungssatelliten, der (a)

¹³Das ist auch die am häufigsten vorkommende Richtung, da in diesem Fall die Erddrehung beim Abschuss ausgenutzt wird. Bei Bahnen in entgegengesetzter Richtung erfolgt die Präzession mit umgekehrtem Vorzeichen (retrograd).

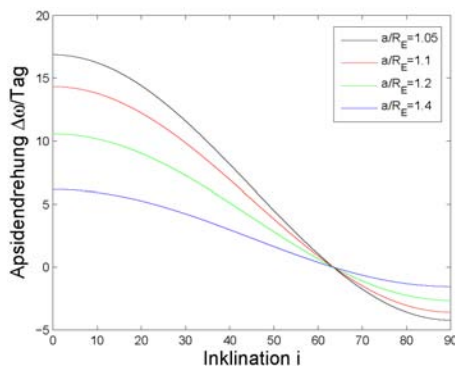


Abbildung 2.13: Apsidendrehung als Funktion der Inklination und des mittleren Abstands

möglichst die gesamte Erdoberfläche im Blick haben soll, (b) eine gewisse Lebensdauer haben soll (Mindestflughöhe 500 km) und (c) ein möglichst hohes (aber gleichzeitig homogenes) Bodenaufklärungsvermögen haben soll.

§ **136** Eine Nutzenanwendung der Drehung der Bahnebene ist die sonnensynchrone Bahn. Hier muss die Drehung der Bahnebene genau 360° pro Jahr betragen, so dass die Bahnebene immer in einem festen Winkel zur Sonne–Erde–Achse steht. Mit einer für einen Erderkundungssatelliten typischen kreisförmigen Bahn ($\varepsilon = 0$) mit großer Inklination (z.B. $i = 80^\circ$) erhalten wir aus (2.22) als Bahnhöhe für die gewünschte sonnensynchrone Bahn $(a/R_E)^{7/2} = 1.76$ und damit $H = a - R_E = 1100$ km.

Apsidendrehung

§ **137** Die mit der Abplattung der Erde verbundene Verzerrung des Gravitationsfeldes bewirkt neben der Drehung der Bahnebene auch eine Drehung der Bahnellipse in dieser Ebene (Apsidendrehung) mit

$$\frac{\Delta\omega}{\text{Tag}} = \frac{5^\circ(5 \cos^2 i - 1)}{\left(\frac{a}{R_E}\right)^{7/2}} (1 - \varepsilon^2). \quad (2.23)$$

Die Apsidendrehung verschwindet, wenn der Zähler Null wird, d.h. für Bahnen mit einer Inklination i von 63.4° , vgl. Abb. 2.13. Daher haben die Bahnen der Molniya-Satelliten genau diese Inklination. Ansonsten würde sich innerhalb von Tagen bis Wochen das Apogäum von der Nord- auf die Südhemisphäre drehen und die Satelliten würden nicht mehr die meiste Zeit eines Umlaufs als Relaisstationen über der FSU stehen.

§ **138** Für Inklinationen größer oder kleiner als 63.4° erfolgt die Apsidendrehung in unterschiedliche Richtungen, mit zunehmendem Abstand wird sie immer geringer.

Verständnisfrage 5 Erläutern Sie anschaulich, warum polare und äquatoriale Bahnen jeweils eine entgegengesetzte Apsidendrehung haben.

2.3.4 Zusammenfassung

§ **139** Die wichtigsten Bahnstörungen für Satelliten sind die Abbremsung durch Reibung, die für niedrig fliegende Satelliten zum Absturz führen kann, und die durch die Abplattung der Erde bedingte Abweichung des Gravitationsfeldes von der Kugelsymmetrie, die zu einer Drehung der Bahnebene (Präzession) und zu einer Drehung der Bahn in der Ebene (Apsidendrehung) führt. Bahnstörungen können messtechnisch eingesetzt werden; so liefert die Abbremsung von Satelliten Informationen über die anderweitig nicht messbare Dichte bzw. Temperatur der Hochatmosphäre. Die durch die Abplattung der Erde bewirkten Effekte lassen sich ebenfalls nutzen: die Präzession kann zur Erzeugung sonnensynchroner Orbits verwendet werden, die Apsidendrehung zur Stabilisierung einer sehr exzentrischen Flugbahn

wie der der Molniya-Satelliten. Die Auswertung von Bahnstörungen im Rahmen der Satellitengeodäsie wird ausführlich diskutiert in Schneider [213].

2.4 Typische Bahnen von erdgebundenen Satelliten

§ 140 Erdsatelliten bewegen sich auf Kreis- oder Ellipsenbahnen. Welcher der in Tabelle 2.3 gegebenen Bahnen die Bahn eines bestimmten Satelliten ähnelt, hängt von den an den Satelliten gestellten Anforderungen ab. Eine grobe Unterteilung können wir nach Satellitentypen vornehmen.

2.4.1 Typen von Erdsatelliten

§ 141 Erdsatelliten lassen sich nach ihrer (hauptsächlichen) Aufgabe klassifizieren. Die wichtigsten Typen sind:

- Erkundungssatelliten, in ihrer militärischen Variante als Aufklärungssatellit bezeichnet;
- Wettersatelliten, die nicht nur, wie durch ihren Namen nahe gelegt, zur Wetterbeobachtung eingesetzt werden, sondern auch Instrumente für allgemeine atmosphärische oder umweltbezogene Untersuchungen an Bord haben, wie z.B. das Advanced Very High Resolution Radiometer AVHRR auf den verschiedenen POES Satelliten, mit denen Schnebedeckungen und Vegetationsindex ebenso wie Ölfilme auf Gewässern vermessen werden können oder der Space Environment Monitor SEM zur Messung von Plasmen und energiereichen Teilchen. Letzteres Instrument fliegt auf dem polaren POES ebenso wie auch seinem geostationären Kollegen GOES.
- Kommunikationssatelliten, die als Relaisstationen zwischen verschiedenen Bodenstationen, zwischen einem Raumflugkörper und einer Bodenstation oder zwischen verschiedenen Raumflugkörpern eingesetzt werden können;
- Navigationssatelliten, die einem Beobachter auf der Erde oder im erdnahen Weltraum eine sehr genaue Positionsbestimmung gestatten;
- Forschungssatelliten, die vielfältige Aufgaben haben können und, da wir Erkundungssatelliten bereits separat aufgelistet haben, nicht auf die Erde sondern nach draußen gerichtet sind.

2.4.2 Erdkundungs- und Aufklärungssatelliten

§ 142 Zivile Erdkundungssatelliten werden auf vielfältige Weise eingesetzt. Waren sie ursprünglich eher experimentelle Einrichtungen, die hauptsächlich zur Kartographie verwendet wurden, so haben sie sich heute zu hochgradig komplexen Systemen von Instrumenten entwickelt, die zur Untersuchung von so verschiedenen Phänomenen wie Schadstoffeinträge in Gewässer, Abholzung des tropischen Regenwaldes, Änderungen im Vegetationsmuster (Desertifikation), Beurteilung von Waldschäden, Meeresströmungen, Planktongehalt im Meerwasser, Ausdehnung des Ozonlochs und vielem mehr eingesetzt werden. Der militärische Zwilling Bruder des Erdkundungssatelliten ist der Aufklärungssatellit – das Spektrum seiner Anwendungen ist etwas schmaler und spezieller.

§ 143 Die meisten Erdkundungs- und Aufklärungssatelliten fliegen auf nahezu kreisförmigen Bahnen mit hoher Inklination. Letztere ist nicht nur durch den Startort festgelegt, sondern gibt gleichzeitig die höchste geographische Breite bis zu der der Satellit gelangt. Eine große Inklination ist daher notwendig, um die Beobachtungen nicht nur auf einen schmalen Breitenstreifen um den Äquator zu beschränken. Die Bahnen sind (möglichst) kreisförmig, um auf allen Abschnitten des Orbits möglichst nahe an der Erdoberfläche zu sein und damit ein gutes Bodenaufklärungsvermögen zu erreichen. Militärische Späher (BigBird [718], KH-11 [752], KH-12 [753] – über KH13 [754] ist nicht genug bekannt) fliegen in Höhen zwischen

200 und 300 km,¹⁴ zivile Erderkundungssatelliten (z.B. SPOT, LandSat, SeaSat, Nimbus, Ikonos, Terra, TerraSAR, POES, Aqua, CloudSat) zwischen 600 und 1000 km – lediglich der hoch auflösende (0.65 m) QuickBird fliegt im Bereich dazwischen auf ca. 400 km [692].¹⁵ Auf Grund der geringen Flughöhen liegen die Umlaufzeiten typischerweise im Bereich von 90 bis 100 min, siehe auch Tab. 2.3, entsprechend 14 bis 16 Orbits pro Tag.

§ 144 Die Bedeutung der Bahnparameter für einen speziellen Satelliten kann man auch aus der Projektion der Satellitenbahn auf die Erdoberfläche, der Bodenspur, erschließen. Abbildung 2.14 zeigt als Beispiel die Bodenspur eines LandSat-Satelliten. Die Bahn ist nahezu polar, so dass ein großer Breitenbereich überdeckt wird (oberes Teilbild). Da sich die Erde unter der Satellitenbahn weg dreht, werden im Laufe des Tages verschiedene Bereiche der Erde überflogen, so dass sich bereits innerhalb eines Tages eine Überdeckung weiterer Bereiche der Erde ergibt (unteres Teilbild). Da der Blickwinkel der Instrumente auf diesem Satelliten zu gering ist, um den gesamten Bereich zwischen zwei benachbarten Bodenspuren beobachten zu können, ist das Überdeckungsmuster der folgenden Tage jeweils versetzt – daher schließt sich die Bodenspur im unteren Teilbild über Südamerika nicht. Für eine komplette Überdeckung sind in diesem Beispiel 248 Umläufe erforderlich, entsprechend einer Dauer von 17 Tagen.

Zwischenrechnung 6 Wie breit muss der entlang der Bodenspur abgetastete Streifen mindestens sein, um wie bei POES während eines Tages die komplette Erdoberfläche abzuscannen? Welchem Blickwinkel entspricht das bei einer Flughöhe von 900 km?

Verständnisfrage 6 Würde man bei geringerer Inklination mit einer geringeren Zahl von Umläufen zur vollständigen Überdeckung auskommen? Ergibt sich für alle Breiten die gleiche Minimalzahl?

§ 145 Der Versatz der Bodenspuren hat für unsere Interpretation von Satellitendaten eine wichtige Konsequenz: es ist nicht möglich, mit einem Satelliten Momentanaufnahmen eines Gebiets zu machen, das breiter ist als der entlang der Bodenspur abgetastete Streifen. Daher sind z.B. die Aufnahmen des Ozonlochs in Abb. 1.4 keine Momentanaufnahmen sondern eine Mittelung von Aufnahmen über einen längeren Zeitraum; gegebenenfalls zuzüglich einer Interpolation für die nicht beobachteten Bereiche. Über den Polen ist diese Interpolation kein allzu großes Problem, da die Breite des entlang der Bodenspur abgetasteten Streifens unabhängig von der geographischen Breite ist und die Bodenspuren in Polnähe konvergieren. Für niedrige Breiten dagegen ist das Zusammensetzen eines entsprechenden Mosaiks wesentlich zeitaufwendiger – insbesondere, da ja auch nicht jeder Überflug gute Daten liefert, z.B. auf Grund von Bewölkung.

§ 146 Die Verwendung einer sonnensynchronen Bahn liefert zusätzliche Informationen, da auf Grund der konstanten Beleuchtungsverhältnisse aus der Länge des Schattens eines Objekts auf seine Höhe zurück geschlossen werden kann, ebenso wie auf seine Struktur (siehe auch Abschn. 2.4.3 und insbesondere Abb. 2.15). Die Verlängerung des Schattens zwischen aufeinander folgenden Umläufen kann damit ein Indiz für bauliche Veränderungen geben. Sonnensynchrone Orbits waren aus diesen Gründen in der Frühzeit der Erdsatelliten im wesentlichen für militärische Aufklärung von Interesse. Im Zuge der immer detaillierteren Untersuchungen des spektralen Reflektionsvermögens z.B. zur Bestimmung von Pflanzenwachstum und -gesundheit sind sonnensynchrone Bahnen in der zivilen Erdfernerkundung ebenfalls von Interesse, da dann das einfallende Spektrum nur durch die atmosphärischen Parameter variiert wird und nicht noch zusätzlich durch Sonnenstand und damit Auftreffwinkel des Lichts auf die Pflanze.

¹⁴Größere Flughöhen verringern das Bodenaufklärungsvermögen, geringere Flughöhen sind nicht sinnvoll, da dann die Reibung in der Restatmosphäre die Lebensdauer des Satelliten drastisch verringert bzw. eine sehr häufige Bahnkorrektur und damit das Mitführen großer Treibstoffmengen erforderlich macht – was für USA 193 als einen wahrscheinlichen KH-13 die Begründung zum Abschuss gab [647, 648, 649, 656].

¹⁵Daraus lässt sich schließen, dass QuickBird keinen besseren Sensor verwendet als z.B. Ikonos sondern einfach nur über die Reduktion der Gegenstandsweite sein Bodenaufklärungsvermögen verbessert.

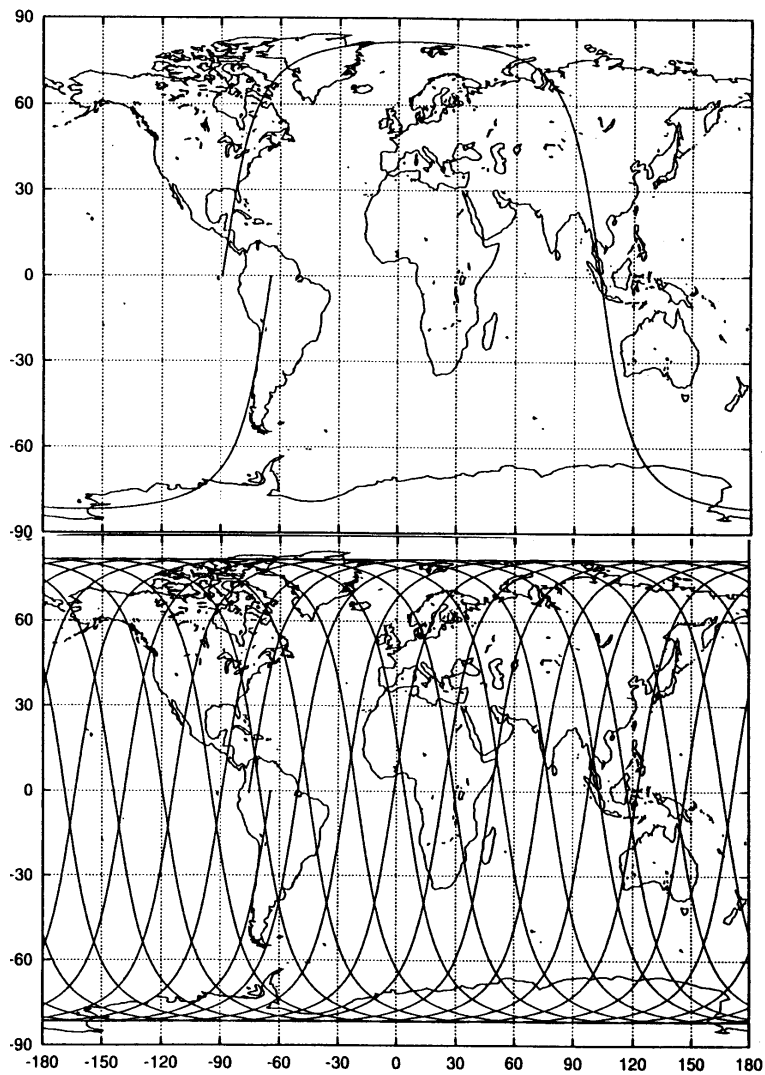


Abbildung 2.14: Bodenspur von LandSat für einen Umlauf (oben) und alle Umläufe eines Tages (unten) [49]

Abbildung 2.15: Ein Gegenstand kann manchmal über seinen Schatten wesentlich einfacher zu identifizieren sein als direkt, wie in dieser Luftaufnahme am Mast der Hochspannungseitung deutlich wird [154]



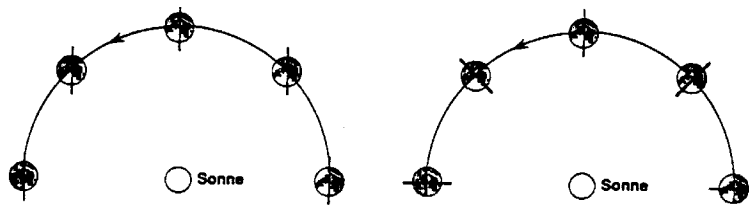
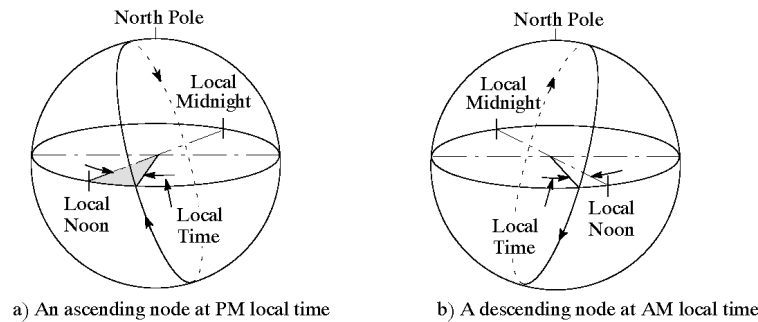


Abbildung 2.16: Polare und sonnensynchrone Bahn [49]



a) An ascending node at PM local time

b) A descending node at AM local time

Abbildung 2.17: Beispiele für sonnensynchrone Bahnen mit unterschiedlicher Lokalzeit [134]

2.4.3 Einschub: Sonnensynchrone Bahnen

§ 147 Die sonnensynchrone Bahn ist ein Beispiel für die Stabilisierung der Bahnebene durch geschickte Ausnutzung einer Bahnstörung. Bei der sonnensynchronen Bahn ist die Bahnebene des Satelliten so ausgerichtet, dass sie stets in einem festen Winkel, meist senkrecht, zur Erde–Sonne–Achse steht. Dazu muss eine feste Beziehung zwischen großer Halbachse a , Exzentrizität ε und Inklination i erfüllt sein, siehe (2.22) und Zwischenrechnung 5.

§ 148 Abbildung 2.16 zeigt ein Beispiel für eine sonnensynchrone Bahn. Im linken Teil der Abbildung ist eine normale polare Bahn dargestellt: da der Bahndrehimpulsvektor und damit die Bahnebene raumfest sind, ändert sich ihre Orientierung im Bezug auf die Achse Sonne–Erde während der Rotation der Erde um die Sonne. Bei einer sonnensynchronen Bahn dagegen driftet der Bahndrehimpulsvektor und damit die Bahnebene derart, dass sie stets in einem festen Winkel zur Erde–Sonne–Achse steht.

§ 149 Abbildung 2.17 zeigt die Lage zweier sonnensynchroner Bahnen mit unterschiedlichen Lokalzeiten. Beide Beispiele sind für Erdfernerkundungssatelliten relativ gebräuchlich, da die Orbits nahezu senkrecht zur Mittag–Nacht–Achse (Äquator wird am lokalen Abend bzw. Morgen gekreuzt) bei beiden Überflügen keine optimalen Beleuchtungsverhältnisse bieten. In den gezeigten Konfigurationen dagegen ist ein Überflug für die im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums arbeitenden Instrumente optimal; der andere Überflug kann im Halbschlaf verbracht werden oder man sieht sich die Welt mal im thermischen Infrarot bzw. mit Radar an. Die Solarzellen liefern ohnehin nicht allzu viel Power; häufig wird außerdem auf der Tagseite eine größere Datenmenge erzeugt als eigentlich übertragen werden kann – diese Daten können jetzt gedumpt werden.

Zwischenrechnung 7 Ist die Power auf der Nachtseite eigentlich ein so großes Problem? Schätzen Sie jeweils den Anteil des Orbits ab, in dem ein Satellit in einer Flughöhe von 250 km, 500 km, 1000 km und 2000 km im Schatten bleibt und auf die Versorgung aus Batterien angewiesen ist.

§ 150 Der Vorteil der sonnensynchronen Bahn liegt bei Erdfernerkundungssatelliten in den gleichbleibenden Beleuchtungsverhältnissen. Dies ist nicht nur für die Klassifikation von Bildelementen (vgl. Abschn. 7.3) wichtig, da ein Blatt dem Auge bzw. der Kamera anders erscheint, je nachdem, ob es von schräg oben oder senkrecht angestrahlt wird, sondern auch für

Abbildung 2.18: Der Schattenwurf der Aare-Brücke bei Bern macht die in der Senkrechtaufnahme sonst nicht erkennbare Konstruktion deutlich [104]



die Entdeckung von baulicher Tätigkeit: diese erfolgt häufig über Veränderungen im Schattenwurf. Auch lassen sich in der Draufsicht keine Details der vertikalen Struktur erkennen – im Schatten dagegen schon, vgl. Abb. 2.15. Dieses Verfahren wurde übrigens auch in der Luftbild-Photographie regelmäßig verwendet, Abb. 2.18 zeigt ein Beispiel.

§ 151 Für Beobachtungen der Sonne ist ein sonnensynchrones Orbit mit einer Bahnebene ungefähr senkrecht zur Erde–Sonne–Achse ebenfalls gut geeignet, da der Satellit die Sonne während des gesamten Umlaufs im Blickfeld hat und die Beobachtungspause auf der Nachtseite der Erde entfällt. Auf einer derartigen sonnensynchronen Bahn wird der Satellit während des gesamten Orbits von der Sonne angestrahlt – bei der Energieversorgung mit Solarzellen ein großer Vorteil.

§ 152 Sonnensynchrone Bahnen sind allerdings häufig nur eine Illusion. So fliegen die POES Satelliten der NOAA offiziell auf sonnensynchronen Bahnen mit einer genau vorgegebenen Zeit für den Äquatorüberflug. Allerdings ist der feste Überflug eine Fiktion, da sich die Bahn im Laufe der Jahre dennoch dreht. Für den Nutzer der Daten gibt es daher eine etwas umfangreichere Datenbank, z.B. [641]. Andere Satelliten werden ebenfalls von einer derartigen Drift des Zeitpunkt des Äquatorüberflugs betroffen sein; das Hauptproblem dürfte darin liegen, dass sich trotz aller Bemühungen das Geoid nicht mit ausreichender Genauigkeit berücksichtigen lässt.

§ 153 Erderkundungssatelliten, die keine Instrumente zur Messung der reflektierten solaren Einstrahlung tragen, fliegen zwar auf vergleichbaren Flughöhen, in der Regel jedoch nicht in sonnensynchronen Bahnen: die durch die sonnensynchrone Bahn bedingten gleichmäßigen Beleuchtungsverhältnisse sind für diese Satelliten nicht erforderlich. Umgekehrt lassen sich durch wechselnde Überflugzeiten zusätzliche Informationen gewinnen (tageszeitliche Variationen) und die Militärs haben das Gefühl, dass ihr späher Blick etwas weniger gut vorhersagbar ist. Letzteres wird aber erst dann relevant, wenn wirklich militärische Späher in Stealth-Technologie fliegen und diese sich nicht zusätzlich regelmäßig durch den Funkverkehr mit der Bodenstation oder sonstiges verraten [717].

2.4.4 Wetter- und Kommunikationssatelliten

§ 154 Wetter- und Kommunikationssatelliten haben sehr ähnliche Orbits und können daher gemeinsam behandelt werden. Beide befinden sich in der Regel auf geostationären Orbits in einer Höhe von ca. 36 000 km über dem Erdboden (vgl. Tabelle 2.3). Ihre Umlaufzeit beträgt 24 Stunden, d.h. der Satellit scheint über einem Punkt fest zu stehen. Das ist für meteorologische Anwendungen interessant, da der Satellit auf diese Weise die lokalen Veränderungen beobachtet. Und für die Kommunikation ist es günstig, da der Satellit vom Boden gesehen stets am gleichen Punkt am Himmel steht und daher Antennen nicht nachgeführt werden müssen. Der Satellit ist für die Kommunikation daher genauso wie eine Bodenstation eine ortsfeste Relais-Station. Für die Kommunikation zwischen Kontinenten befinden sich die Satelliten über den Ozeanen, für die Kommunikation innerhalb eines Kontinents über diesem. Drei äquidistante Satelliten sind ausreichend, um eine nahezu vollständige Überdeckung der Erdoberfläche zu gewährleisten, vgl. linkes Teilbild in Abb. 2.19.

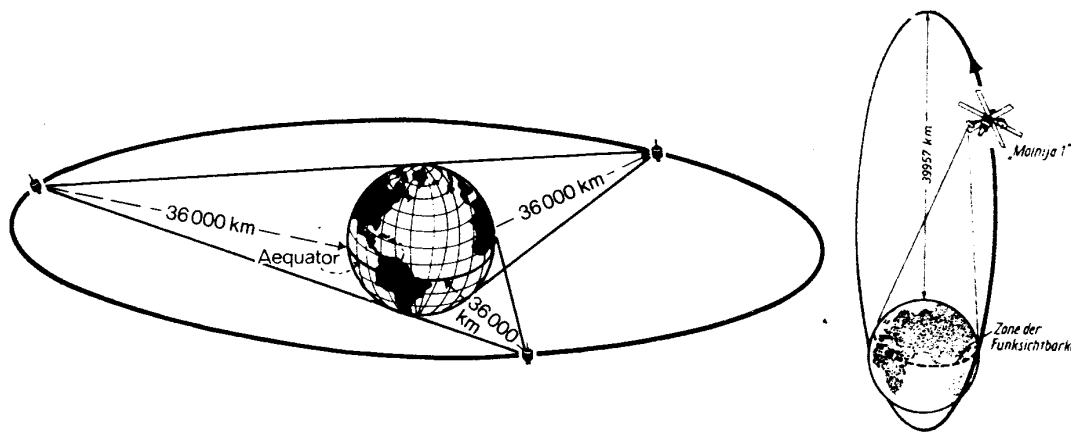


Abbildung 2.19: Kommunikationssatelliten: Überdeckung der Erdoberfläche mit Hilfe von drei geostationären Satelliten (links) und Molniya-Orbit (rechts)

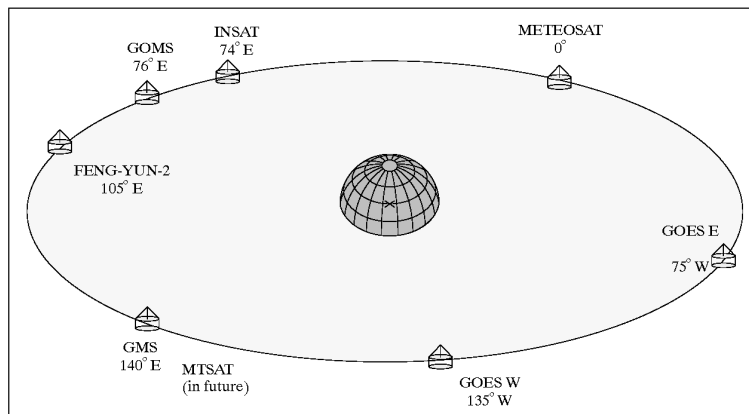


Abbildung 2.20: Verteilung der Wettersatelliten im geostationären Orbit [134]

Verständnisfrage 7 Wieso nahezu vollständig? Was fehlt?

§ 155 Geostationäre Satelliten haben jeweils die gesamte dem Satelliten zugewandte Fläche der Erde im Blick. Allerdings möchte jeder Wetterdienst/jedes Land sich selbst und bestimmte Bereiche (bevorzugt die Richtungen, aus denen das Wetter normalerweise kommt) im Blickfeld haben – und, wie in § 23 angedeutet, an der Neuaufgabe des Wettlaufs ins Weltall teilhaben. Daher sammeln sich an einigen Stellen im geostationären Orbit verschiedene Familien meteorologischer Satelliten, wie in Abb. 2.20 angedeutet.

§ 156 Das Problem geostationärer Satelliten ist die Überfüllung des Orbits: allein 1991 wurden 26 Satelliten in geostationäre Orbits gestartet, die meisten davon zivile Kommunikationssatelliten. Auch in den folgenden Jahren waren die Zahlen vergleichbar. Bei der Überfüllung ist der mechanische Gesichtspunkt unerheblich, vom Standpunkt der Kommunikation dagegen ist ein Mindestabstand von 2° notwendig, d.h. es sind insgesamt 180 Plätze zu vergeben, verglichen mit 26 Starts alleine in einem Jahr und 360 aktiven quasi-geostationären Satelliten Anfang 2008 [692]. Lösungsvorschläge dieser technischen Variante eines Überbevölkerungsproblems werden in [200] diskutiert. Eine Lösungsmöglichkeit besteht in der Verwendung von Orbits ähnlich denen der Molniya-Satelliten oder die Nutzung von pseudo-geostationären Orbits mit einer Inklination von einigen (oder auch mehreren) Grad, die aus Sicht eines Beobachters auf der Erde eine quasi-Oszillation des Satelliten entlang

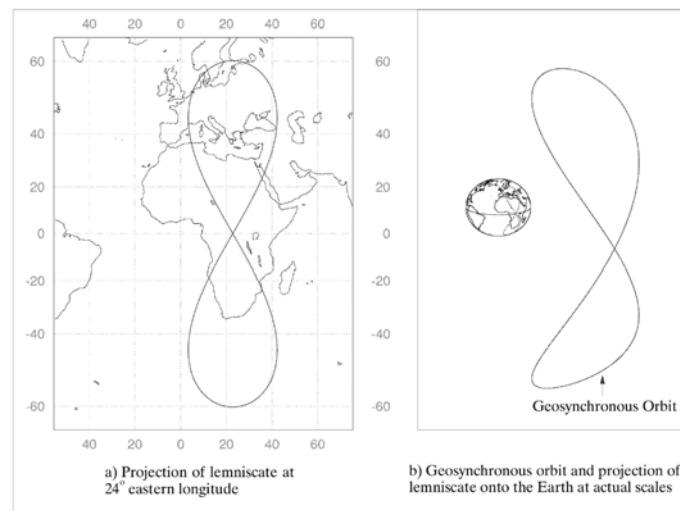


Abbildung 2.21: Geosynchrones Orbit mit einer Inklination von 60° [134]

eines Längengrades über den durch die Inklination definierten Bereich bewirken würde. Abbildung 2.21 zeigt ein Beispiel für ein derartiges geosynchrones Orbit mit einer Inklination von 60° .

Verständnisfrage 8 Warum steht der Satellit nicht fest über einem Längengrad sondern hat als Bodenspur die Lemniskate? Argumentieren Sie anschaulich und versuchen Sie anschließend formal zu begründen, warum die sich ergebende Kurve eine Lemniskate ist.

§ 157 Geostationäre Bahnen sind per Definition äquatoriale Bahnen, da der Erdmittelpunkt als Massenmittelpunkt in der Bahnebene liegen muss. Mit von Null verschiedenen Inklinationen lassen sich zwar auch Orbits erreichen, bei denen die Umlaufzeit 24 Stunden beträgt, jedoch oszilliert der Satellit dann entlang eines Längengrades um den Äquator, wie oben diskutiert. Für viele Anwendungen können die Nachteile dieses Orbits durch die Vorteile beim Start aufgewogen werden: jeder Satellit, der von einem Startplatz in einem gewissen Abstand vom Äquator gestartet wird, hat mindestens die Inklination, die der geographischen Breite seines Startorts entspricht. In höherer Breite gestartete Satelliten können daher nur über energieaufwendige Manöver in äquatoriale Bahnen gebracht werden – was das Mitführen von Treibstoff und entsprechend leistungsfähigen Antriebsaggregaten erfordert und damit zu Lasten der transportierbaren Nutzlast geht. Außerdem kann man versuchen, der Lemniskate ein sinnvolles Timing zu geben, z.B. für den auf Europa fixierten MeteoSat mit einem Tagteil des Orbits über der Nordhemisphäre und einem Nachtteil über der Südhemisphäre.

§ 158 Auf Grund ihrer geographischen Lage konnte die UdSSR/FSU mit Startplätzen oberhalb von 30° N kein System geostationärer Kommunikationssatelliten aufbauen. Stattdessen wurde ein System von Kommunikationssatelliten in hochgradig elliptischen Bahnen betrieben. Diese Molniya-Satelliten (Molniya = Blitz, [369, 550]) haben ein Perigäum bei ca. 400 km, ein Apogäum bei ca. 40 000 km und eine Inklination von 65° . Damit ergibt sich eine Umlaufzeit von ca. 12 Stunden. Da das Apogäum über dem Nordpol gewählt wurde, vgl. rechter Teil von Abb. 2.19, halten sich die Satelliten während ca. $2/3$ ihrer Umlaufzeit im Empfangsbereich einer Bodenstation der FSU auf und bewegen sich zugleich nur relativ langsam entlang ihrer Bahn – eine Animation ist unter [393] zu finden, die Bodenspur ist z.B. in [737] gegeben. Eine vollständige Überdeckung wird durch die Verwendung jeweils eines Satellitenpaares erreicht, wobei der zweite Satellit in einem um 90° versetzten Orbit fliegt.

Verständnisfrage 9 Ist ein Versatz um 90° sinnvoll? Warum nicht ein um 180° versetztes Orbit? Und hat die Gradangabe überhaupt eine Bedeutung?

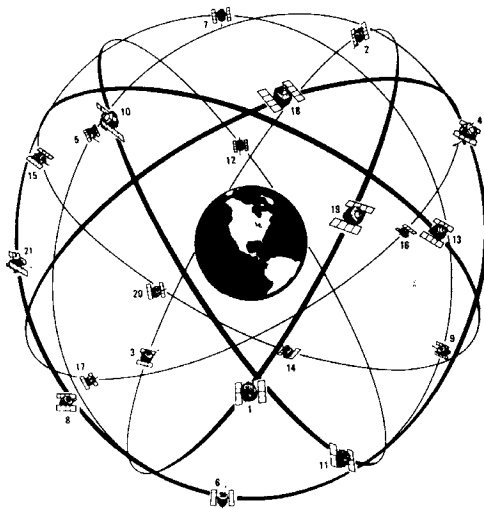


Abbildung 2.22: Konfiguration der GPS-Satelliten [135]

2.4.5 Navigationsatelliten

§ 159 Navigationsatelliten sind ursprünglich ebenfalls militärische Systeme, die es Einheiten bzw. einzelnen Soldaten ermöglichen sollen, ihren Standort genau zu bestimmen, und die natürlich auch für die Lenkung automatischer Waffensysteme verwendet werden. Das System hat sich dann in spezielle zivile Anwendungen eingeschlichen, insbesondere die Funkortung für die Luft- und Seefahrt. Auch Erdfernerkundungssatelliten benutzen GPS zur genauen Positionsbestimmung, die bodengebundenen Landvermesser ebenfalls.

§ 160 Gerade im Bereich der Navigation liegt eine starke Kopplung zwischen ziviler und militärischer Nutzung vor [171].¹⁶ Das bekannteste System, NavStar bzw. GPS (Global Positioning System), wurde ursprünglich in unterschiedlichen Modi für die militärische und die zivile Nutzung betrieben: die militärische Variante mit einer Genauigkeit der Ortsbestimmung von ca. 1 m, die zivile mit einer Genauigkeit im Bereich von einigen 10 Metern. Dieses künstliche Verrauschen der zivil genutzten Signale wurde Mitte der Neunziger Jahre abgeschaltet, so dass jetzt auch zivilen Nutzern eine Genauigkeit im Bereich von Metern zur Verfügung steht.¹⁷ Und heute kann man dem GPS-Empfänger im Handy oder Navi kaum entgehen – obwohl gerade im städtischen Bereich die WLAN-Ortung [167] besser funktionieren kann.

§ 161 Das Verfahren der Ortsbestimmung ist ähnlich der zur Bestimmung der Höhe eines Gebäudes oder Berges verwendeten Triangulation. Um einen Ort im Raum zu bestimmen, ist es ausreichend, drei Orte mit genau bekannter Lage anzupeilen und die dazu gehörigen Richtungswinkel zu bestimmen.¹⁸ Auf die GPS-Satelliten übertragen bedeutet dies, dass mindestens drei von ihnen im Blickfeld eines jeden Punktes auf der Erdoberfläche sein müssen.

¹⁶Die enge Verquickung mit dem Militär ist einer der Hauptgründe dafür, dass die EU sich nicht auf das amerikanische Global Positioning System (GPS) [265] verlassen möchte sondern mit Galileo [359] ein eigenes Navigationssystem aufbauen möchte.

¹⁷Bei kleinen kommerziellen GPS-Empfängern beträgt die Genauigkeit in den horizontalen Koordinaten wenige Meter, kann jedoch bei schlechter Satellitenüberdeckung (insbesondere in städtischen Bereichen und in (Straßen)Schluchten ist das ein Problem) geringer sein. Ein generelles Problem ist die Genauigkeit der vertikalen Koordinate – diese kann auch mal um 100 m versetzt sein. Das bedeutet z.B. auf einem Leuchtturm stehend eine Höhenkoordinate von -32 m, d.h. 32 m unter NormalNull, zu erhalten. Einfache GPS-Systeme sind außerdem nicht in der Lage, schnelle Änderungen in Kurs und Geschwindigkeit korrekt zu erkennen, da ein Teil der Auswertung auf Dead Reckoning – d.h. der Extrapolation auf der Basis der vorherigen Geschwindigkeit – basiert. Für Navis in Fahrzeugen wird daher teilweise statt Dead Reckoning die Umdrehung der Räder verwendet.

¹⁸Die Genauigkeit des Verfahrens hängt natürlich von der Lage der drei Orte ab – im Extremfall, dass alle drei auf einer Linie liegen, kann man den eigenen Ort nicht bestimmen sondern nur eine Linie angeben, auf der er liegen muss. Entsprechend ungenau wird das Verfahren, wenn alle drei angepeilten Punkte dicht bei einander liegen.

Praktisch wird das GPS-System durch 21 NavStar Satelliten auf sechs nahezu kreisförmigen Orbits mit einer Umlaufhöhe von ca. 20 000 km und einer Periode von 12 Stunden realisiert, vgl. Abb. 2.22. Die Idee des Systems basiert darauf, dass von jedem Punkt der Erde mindestens vier dieser Satelliten angepeilt werden können.¹⁹ Der vierte Satellit ist deshalb wichtig, weil das System im Gegensatz zu bodengebundenen Peilstationen einen zeitliche Komponente hat: die Satelliten sind nicht ortsfest sondern bewegen sich relativ zum Erdboden. Vereinfacht gesagt soll der vierte Satellit eine zeitliche Synchronisation ermöglichen: aus seinem Signal wird die genaue Zeit und damit der genaue Ort der drei für die Ortsbestimmung verwendeten Satelliten ermittelt.²⁰ Eine ausführliche Darstellung des GPS gibt z.B. [98].

2.4.6 Forschungssatelliten

§ 162 Forschungssatelliten bilden eine inhomogene Gruppe mit ihrer wissenschaftlichen Fragestellung angepassten Bahnen. Einige Beispiele für erdgebundene Forschungssatelliten sind im Folgenden aufgelistet.

- für die Erforschung des interplanetaren Raums von erdgebundenen Satelliten aus werden stark exzentrische Orbits verwendet, z.B. IMP (Interplanetary Monitoring Platform [529]) und WIND [434]. Dadurch befindet sich der Satellit lange Zeit außerhalb der Erdmagnetosphäre; das Bahnkonzept ist ähnlich dem der Molniya-Satelliten, jedoch mit deutlich größerer Flughöhe. Eine Alternative ist eine Raumsonde im Lagrange Punkt. Letzteres ist der Punkt auf der Achse Sonne–Erde, in dem sich die Gravitationskräfte der beiden genau aufheben. Beispiele sind ISEE-3 (International Sun Earth Explorer [440]), SOHO (Solar and Heliospheric Observatory [613]) und ACE [272]. Letzteres sind allerdings keine Satelliten mehr (sie umkreisen keinen Zentralkörper), sondern Raumsonden bzw. Raumflugkörper.
- Satelliten zur Erforschung der Erdmagnetosphäre befinden sich ebenfalls auf stark exzentrischen Orbits, allerdings mit geringerer Flughöhe. Die starke Exzentrizität erlaubt es, die radiale Variation der Magnetosphäre zu untersuchen; Beispiele sind ISEE-1,2 [530, 531] und Cluster-II [355]. Da die Magnetosphäre zeitlich und räumlich sehr variabel ist, sind in-situ Messungen mit einem einzelnen Satelliten nicht aussagekräftig, daher wurde ISEE im Doppelpack (mit ISEE 3 als zusätzlicher Warnboje im interplanetaren Raum) gestartet, Cluster-II fliegt sogar als Quartett (Salsa, Samba, Rumba, Tango).
- Für astrophysikalische Fragestellungen und solare Beobachtungen werden meist nahezu kreisförmige Bahnen in Höhen von einigen hundert Kilometern verwendet. Dies ergibt sich vielfach aus der Größe der Satelliten, ein VW-Bully ist klein und leicht gegen einige von ihnen. Diese Satelliten wurden vom Space Shuttle ausgesetzt, führen aber auf Grund ihrer Größe und Masse kaum Treibstoff für Bahnmanöver mit sich, müssen also im wesentlichen dem Shuttle-Orbit folgen. Dies hat auch einen Vorteil: die Satelliten können mit Hilfe des Shuttle gewartet oder repariert werden, so wurde z.B. dem Hubble Space Telescope HST [378, 528] eine Brille verpasst, um seine Abbildungsqualität zu verbessern. Beispiele für astrophysikalisch orientierte Forschungssatelliten sind:
 - Solwind P78-1 ($H = 530$ km, $i = 98^\circ$) zur Erforschung der Ionosphäre und der Magnetosphäre sowie zur Beobachtung der Sonne (Koronograph). Dieser militärische Forschungssatellit wurde nach 6 1/2 Jahren erfolgreicher Arbeit, obwohl noch voll funktionsfähig, von der US Air Force als Zielsatellit für Anti-Satellitenwaffen zweckentfremdet [441];
 - Solar Maximum Mission SMM [493] ($H = 490$ km, $i = 29^\circ$) als Sonneobservatorium. SolarMax war der erste Satellit, der von einem Shuttle zu Reparaturzwecken wieder

¹⁹Ein einfacher GPS-Empfänger kann die Informationen von bis zu 12 GPS-Satelliten verarbeiten – sofern er so viele im Blickfeld hat. Auf [728] gibt es eine kleine Animation, aus der man erkennen kann, wie sich die Zahl der im Blickfeld befindlichen Satelliten im Laufe der Zeit verändert.

²⁰Für die sehr genaue Ortsbestimmung (Landvermessung, einige Rettungssysteme) verwendet man ein differentielles GPS (DGPS): zusätzlich zu den Satellitensignalen werden die Signale einer ortsfesten Bodenstation als Referenz verwendet. Damit lassen sich die Satelliteninformationen korrigieren und Genauigkeiten im Bereich von einigen Zentimetern erreichen.

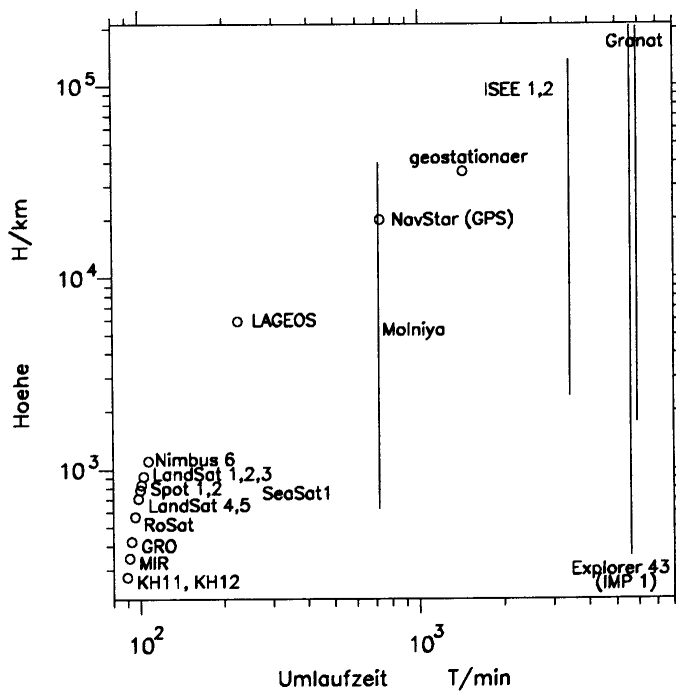


Abbildung 2.23: Höhen und Umlaufzeiten verschiedener Satelliten. Die Kreise markieren Satelliten auf nahezu kreisförmigen Bahnen, die Linien Satelliten in sehr exzentrischen Orbits.

eingefangen wurde. Er stürzte 1989 nach 10 Jahren Betriebszeit in der Folge hoher solarer Aktivität ab – und wurde damit ein Opfer seines Beobachtungsobjektes.

- Solar A (Yokoh [388, 604]) ($H = 650$ km, $i = 31^\circ$) dient der Röntgenbeobachtung der Sonne und wurde, wie seine hohe Flugbahn andeutet, nicht vom Shuttle sondern von einer Rakete gestartet.
- Gamma Ray Observatory GRO, [492] später umbenannt in Compton Gamma Ray Observatory CGRO [439] ($H = 420$ km, $i = 29^\circ$) zur Gammabeobachtung und zur Suche nach neuen Röntgenquellen im Universum. Sein Nachfolger RHESSI (Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager) befindet sich in ähnlichem Orbit.
- Hubble Space Telescope HST ($H = 615$ km, $i = 29^\circ$) als nicht von der Erdatmosphäre beeinträchtigt astronomisches Teleskop.

Die sehr ähnlichen Inklinationen der Bahnen dieser Forschungssatelliten ergeben sich durch die geographische Breite des Startorts, im Falle von SMM, GRO und HST wurde vom Kennedy Space Center (Cape Canaveral) auf einer Breite von N29 gestartet, Yokoh wurde von Tanegashima bei N31 gestartet.

2.4.7 Zusammenfassung

§ 163 Die Bahn eines Satelliten wird der Zielsetzung der Mission angepasst. Militärische Satelliten (KH-11 [752], KH-12 [753] in Abb. 2.23) fliegen in geringer Höhe auf Kreisbahnen. Erdkundungssatelliten (LandSat, SeaSat, SPOT, Nimbus, Terra, Aqua, EnviSat, ...) bewegen sich ebenfalls auf Kreisbahnen, jedoch in größerer Höhe um die Einflüsse der Reibung geringer zu halten und bei immer noch ausreichend guter Bodenauflösung größere Bereiche überblicken zu können. Im Höhenbereich zwischen diesen beiden Arten von Erdfernerkundungssatelliten befinden sich die Raumstationen (ISS – auch MIR hatte eine vergleichbare Flughöhe) und astrophysikalische Forschungssatelliten (RoSat, GRO). Hier sind die Bahndetails stark durch die Erreichbarkeit des Orbits mit Raumfähren oder -kapseln bestimmt. In Höhen oberhalb 2 000 km finden sich auf Kreisbahnen nur noch die NavStar-Satelliten des Navigationssystems GPS und ihre russischen GLONASS-Kollegen, die geostationären Kommunikations- und Wettersatelliten sowie vereinzelt Forschungssatelliten (z.B. LAGEOS, Cluster-II). Die meisten Orbits hoch fliegender Satelliten sind stark exzentrisch: einerseits

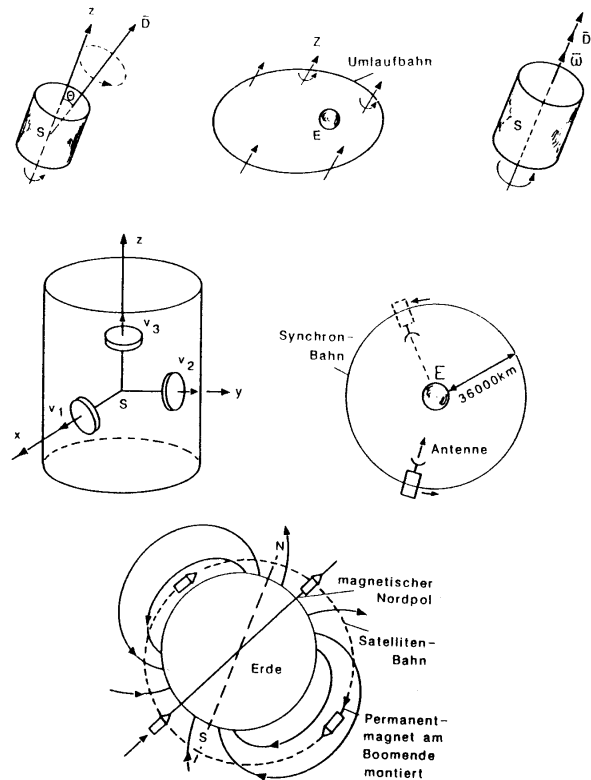


Abbildung 2.24: Stabilisierungssysteme: Spinstabilisierung (oben), Drei-Achsen-Stabilisierung (Mitte) und passive Stabilisierung (unten) [85]

auf Grund der Zielsetzung (bei Molniya lang dauernder Aufenthalt über der FSU, in der Magnetosphärenforschung Überdeckung eines weiten radialen Bereichs), andererseits aber auch, weil es energetisch wesentlich weniger aufwendig ist, einen Satelliten in eine Ellipsenbahn mit weit entferntem Apogäum zu bringen als in eine Kreisbahn mit entsprechendem Radius.

Verständnisfrage 10 Stimmt die Aussage überhaupt? Gleichung (2.16) haben wir doch derart interpretiert, dass die Energie nur von der großen Halbachse abhängt – müsste Sie dann nicht für Kreis und Ellipse gleich sein und damit zum Einbringen in die Kreisbahn keine zusätzliche Energie erforderlich sein?

2.5 Stabilisierung des Satelliten

§ 164 Die Stabilisierung eines Satelliten auf seiner Bahn betrifft nicht mehr die Bahn sondern die Lage des Satelliten in dieser Bahn und damit die Ausrichtung der auf dem Satelliten befindlichen Instrumente relativ zur Bahn und zum Target. Neben den Instrumenten muss auch die Antenne ausgerichtet werden, so dass diese stets auf eine Empfangs- oder Relaisstation – was gegebenenfalls ein anderer Satellit sein kann – gerichtet ist.

§ 165 Formal muss die Bewegung des Satelliten in zwei Teile zerlegt werden: (a) die Bewegung des Massenmittelpunkts auf seiner Bahn, wie bisher in diesem Kapitel betrachtet, und (b) die Bewegung des Satelliten um seinen Massenmittelpunkt. Um die Ausrichtung der Instrumente und Antennen zu gewährleisten, bedient man sich verschiedener Stabilisierungssysteme, für Zusammenfassungen siehe z.B. [68, 85, 138, 225, 261].

§ 166 Abbildung 2.24 gibt einen Überblick über verschiedene Lageregelungs- oder Stabilisierungsverfahren. Diese lassen sich in drei Klassen einteilen: Spinstabilisierung (oben), Drei-Achsen-Stabilisierung (Mitte) und passive Stabilisierung (unten).

§ 167 Das einfachste Verfahren zur Stabilisierung eines Satelliten oder eine Raumsonde ist die Spinstabilisierung: der Satellit rotiert um eine Achse mit großem Trägheitsmoment, meist um die Figurenaxe. Die Rotationsachse $\vec{\omega}$ ist parallel zum raumfesten Drehimpulsvektor \vec{L} . Auf Grund der Drehimpulserhaltung widersetzt sich der Satellit wie ein Kreisel jeder Änderung seiner Drehachse. Für praktische Anwendungen reichen zur Stabilisierung Spingeschwindigkeiten in der Größenordnung von einer Umdrehung pro Sekunde (Beispiele: TIROS I: 1/6 U/s; Syncom [586] 2.7 U/s; Helios 1 [523, 524] U/s).

§ 168 Spinstabilisierung ist für die Erdfernerkundung unpraktisch: sofern die optische Achse des Instruments nicht mit der Drehachse des Satelliten zusammenfällt, ergibt sich ein ständig wechselndes Blickfeld. Für Aufnahmen der Erde ist Spinstabilisierung daher keine geeignete Form der Lagereglung. Für andere Typen von Instrumenten, z.B. Instrumente zur Messung energiereicher Teilchen, dagegen sind spinnende Plattformen von Vorteil: durch die Änderung der Blickrichtung wird der gesamte Raum abgescannt und man kann auf diese Weise die Richtungsverteilung der einfallenden Teilchen bestimmen und nicht nur die Teilchenintensitäten aus einer bestimmten Richtung. Ausnahme in der Erdfernerkundung sind auch viele meteorologische Satelliten: hier wird die Spinstabilisierung (Drehachse senkrecht zur Bahnebene) gleichzeitig zum Scannen genutzt mit dem Vorteil eines einfachen Instruments ohne bewegliche mechanische Bestandteile. Die Konfiguration, bei der der Satellit gleichsam seine Bahn entlang spinnt, wird als Cartwheel bezeichnet (bitte nicht mit dem Cartwheel beim SAR in § 509 verwechseln) – TIROS 9 [591] war der erste Vertreter dieser Rad schlagenden Spezies.

§ 169 Da die Drehachse bei spinnenden Raumsonden in der Regel senkrecht auf der Bahnebene steht, gibt es keine Möglichkeit, eine Richtantenne mit fester Ausrichtung auf eine Bodenstation auf dem Raumfahrzeug zu montieren. Daher muss zur Gewährleistung der Funkverbindung die Antenne relativ zum Satelliten rotieren, um eine Ausrichtung auf die Erde zu gewährleisten. Die Genauigkeit, mit der diese Gegenrotation erfolgt, ist so gross, dass für Helios 1 erst 12 Jahre nach dem Start des Satelliten eine Abweichung auftrat, die so groß war, dass der relativ schmale Strahl der Antenne die Erde nicht mehr traf. Bei einer Rotationsperiode von 1/s heißt das, dass der Antennenstrahl erst nach ca. 360 Mio Rotationen um wenige Grad von seiner ursprünglichen Richtung abgewichen ist.

§ 170 Bei der Drei-Achsen-Stabilisierung wird die momentane Lage des Satelliten durch Momentenaustausch mit Stellgliedern, z.B. Schwungrädern [211], gehalten. Dadurch lässt sich eine feste Ausrichtung von Antennen bzw. Instrumenten erreichen. Drei-Achsen-Stabilisierung erfolgt bei vielen geostationären Satelliten (Kommunikation), Erdfernerkundungssatelliten und bei vielen interplanetaren Raumsonden (z.B. Pioneer [499], Voyager [476], ISEE-3 [440]).

§ 171 Passive Stabilisierungssysteme nutzen die Umgebungsbedingungen zur Orientierung, z.B. Strahlungsdruck, Gravitationsgradienten oder terrestrisches Magnetfeld. Im unteren Teil von Abb. 2.24 ist als Beispiel die Lagestabilisierung des ersten deutschen Forschungssatelliten, Azur, durch das Magnetfeld dargestellt. Im Satelliten ist ein starker Permanentmagnet eingebaut. Da sich der Satellit auf einer polaren Umlaufbahn befindet, dreht er sich während eines Umlaufs um die Erde auch einmal um seine Achse. Bei Abweichungen aus seiner Lage parallel zu den Magnetfeldlinien bewirkt der Permanentmagnet ein rücktreibendes Moment, so dass die Satellitenachse stets parallel zu den Feldlinien bleibt und stets das gleiche Ende des Satelliten in Richtung auf den magnetischen Nordpol weist.

§ 172 Stabilisierung ist insbesondere auf den frühen Missionen ein interessantes Problem, wenn diese über einen simplen Tape-Recorder zum Zwischenspeichern der Daten verfügen (wie z.B. die Voyager und Pioneer Sonden). Drehimpulserhaltung fordert, dass jedes An- und Ausschalten des Recorders mit einer entsprechenden Ausweichbewegung quittiert wird – was einem Ausweichen der Antenne aus der Zielrichtung entsprechen kann. Heutige Satelliten verfügen im Bereich der Datenspeicherung sicherlich über weniger bewegliche Instrumente – die Stabilisierung bleibt jedoch ein Problem, da sich (a) die meisten Satelliten erst im Orbit entfalten (insbesondere die Solarpanel) und der sich daraus ergebende Drehimpuls kontrolliert

gedämpft werden muss, und (b) da die modernen Instrumente häufig über bewegliche Teile verfügen, z.B. um auch mal einen Blick zur Seite werfen zu können.

2.6 Einbringen des Satelliten in seine Bahn

§ 173 Das Einbringen eines Satelliten in seine Umlaufbahn setzt sich in der Regel aus mehreren Prozessen zusammen: dem Einbringen des Satelliten in eine niedrige kreisförmige Umlaufbahn mit Hilfe einer Rakete oder des Space Shuttle und dem anschließenden, auf Grund der Begrenzung der mitgeführten Treibstoffvorräte energetisch möglichst günstig zu gestaltenden Transfer in sein Ziel-Orbit (Hohmann-Bahnen). Transferbahnen sind nicht nur für die Positionierung von Satelliten in einer Erdumlaufbahn von Interesse sondern ebenso für Missionen zu anderen Planeten oder, vielleicht heute nicht mehr ganz so aktuell, zum Mond.

§ 174 Der Start eines Satelliten ist, insbesondere wenn die zur Verfügung stehende Energie optimal ausgenutzt werden soll, kein trivialer Vorgang. Die drei wichtigsten Probleme sind:

- die Eigenbewegung der Erde: die Erdrotation sowie die Rotation der Erde um die Sonne sind mit Eigengeschwindigkeiten von ca. 0.5 km/s bzw. 30 km/s verbunden. Diese relativ hohen Geschwindigkeiten können unterstützend verwendet werden – allerdings nur bei Start in Richtung dieser Bewegungen. Bei Start in die entgegengesetzte Richtung müssen diese Geschwindigkeiten zusätzlich überwunden werden.
- der Luftwiderstand in niedrigen Höhen verhindert große Startgeschwindigkeiten. Aber selbst bei vernachlässigbarem Luftwiderstand könnte man keine zu großen Anfangsgeschwindigkeiten verwenden, da dann die initiale Beschleunigung zu groß wäre und damit starke Belastungen für die mechanische Struktur von Satelliten und Instrumenten mit sich bringen würde; von der Belastung der Astronauten auf bemannten Missionen ganz zu schweigen.
- der zum Antrieb erforderliche Brennstoff muss mit angehoben werden, d.h. also auch mit beschleunigt werden.

2.6.1 Raketengleichung

§ 175 Die Notwendigkeit, den Treibstoff mit anzuheben, führt auf die Raketengleichung. Darin wird die Beschleunigung einer veränderlichen Masse (die Rakete wird durch das Verbrennen der Treibgase leichter) unter Einwirkung einer konstanten Kraft (die Verbrennungsgase strömen mit konstanter Rate und konstantem Impuls aus) betrachtet.

§ 176 Da sich die Masse der Rakete während der Beschleunigung ändert, ist die Bewegungsgleichung gegeben zu

$$\dot{m}\ddot{x} = \sum F_i \quad \Rightarrow \quad \ddot{x} = \frac{1}{\dot{m}} \sum F_i .$$

Als Kräfte sind auf der rechten Seite die Schubkraft, die Reibung und die Gravitation einzusetzen.

§ 177 Die von der Höhe (und der zeitlich veränderlichen Masse) abhängige Gravitationskraft ist

$$F_g = -m(t)g(x(t)) = -m(t)g_0 \frac{R}{R+x}$$

mit g_0 als der Gravitationsbeschleunigung am Erdboden, R als dem Erdradius und x als der Höhe (und damit gleichzeitig als der Ortskoordinate der Rakete).

Verständnisfrage 11 Können Sie die Aussage bezüglich $g(x)$ formal begründen?

§ 178 Die Schubkraft hängt von der Ausströmgeschwindigkeit v_{rel} der Verbrennungsgase und dem Massenstrom \dot{m} ab:

$$F_{\text{Schub}}(t) = -\dot{m}(t)v_{\text{rel}}(t) = -\frac{m_{\text{leer}} - m_0}{t_B} v_{\text{rel}} .$$

Dabei wird die Ausströmgeschwindigkeit v_{rel} als konstant angenommen. Der Massenstrom ergibt sich bei konstanter Verbrennungsrate zu

$$\dot{m} = \frac{m_{\text{leer}} - m_0}{t_{\text{B}}}$$

mit m_0 als der Startmasse der vollbetankten Rakete, m_{leer} als der Masse der leeren Rakete bei Brennschluss und t_{B} als der Brenndauer. Aus dem Massenstrom lässt sich auch direkt die Abhängigkeit der Raketenmasse von der Zeit bestimmen als

$$m(t) = m_0 - \frac{m_0 - m_{\text{leer}}}{t_{\text{B}}} t .$$

§ 179 Die Reibungskraft ist bestimmt durch den Widerstandsbeiwert c_w , die angeströmte Fläche A , die von der Höhe abhängige Dichte $\varrho(x)$ der Luft sowie der Geschwindigkeit v :

$$F_{\text{Reib}} = -\frac{1}{2} c_w A \varrho(x) \dot{x}^2 .$$

Die Höhenabhängigkeit der Dichte lässt sich abschätzen zu

$$\varrho(x) = \varrho_0 \left(1 - 22.6 \cdot 10^{-6} \frac{x}{1 \text{ m}} \right)^{4.255}$$

mit ϱ_0 als der Dichte am Erdboden.

Zwischenrechnung 8 Lässt sich die Abschätzung in irgendeiner Form mit der barometrischen Höhenformel in Beziehung setzen? Oder finden Sie eine andere Begründung für diese Näherung?

§ 180 Kombination dieser Kräfte liefert für die Beschleunigung in Abhängigkeit von Zeit t , Ort x und Geschwindigkeit \dot{x}

$$\ddot{x}(t, x, \dot{x}) = \frac{1}{m_0 - \frac{m_0 - m_{\text{leer}}}{t_{\text{B}}} t} \left(\frac{m_0 - m_{\text{leer}}}{t_{\text{B}}} v_{\text{rel}} - \frac{1}{2} c_w A \varrho_0 \left(1 - 22.6 \cdot 10^{-6} \frac{x}{1 \text{ m}} \right)^{4.255} \dot{x}^2 \right) - g_0 \frac{R}{R + x} \quad (2.24)$$

§ 181 Diese Differentialgleichung ist nicht sehr kooperativ, da die Reibung einen nicht-linearen Term einbringt, ebenso die Höhenabhängigkeit. Daher ist eine numerische Lösung erforderlich – oder eine Näherung.

Gravitationsfrei und luftleer

§ 182 Der einfachste Ansatz ist eine Rakete im gravitationsfreien und luftleeren Raum, d.h. wir beschränken uns auf Impulserhaltung. Die folgende Darstellung ist nicht sehr elegant, folgt aber der klassischen Herleitung der so genannten Raketengleichung. Daher sei sie hier trotzdem zitiert. Außerdem ist der Ansatz für die Beschreibung der Übergangsbahnen trotzdem sinnvoll.

§ 183 Die Impulserhaltung wird formuliert mit den Impulsen $m(t)v(t)$ der Rakete und dem Impuls $(v(t) - v_0)\beta dt$ der ausgestoßenen Treibgase mit v_0 als der Ausströmgeschwindigkeit und β als der Ausströmrate: $dm = \beta dt$. Die Rakete erfährt in einem Zeitintervall dt beim Ausströmen des Treibgases eine Änderung dp des Impulses gegenüber ihrem Impuls p am Anfang des Zeitintervalls:

$$p + dp = (m - \beta dt)(v + dv) \quad \text{bzw.} \quad p = (m - \beta dt)(v + dv) + \beta dt(v - v_0) .$$

Ausmultiplizieren und Vernachlässigung des Gliedes $dm dv$ liefert

$$dv = -v_0 \beta dt / m \quad (2.25)$$

und damit für die Schubkraft F , die einer Rakete der momentanen Masse m die Beschleunigung dv/dt erteilt,

$$F = v_0 \beta . \quad (2.26)$$

Tabelle 2.5: Äußerer Wirkungsgrad einer Rakete

Geschwindigkeits- verhältnis v_B/v_0	Massen- verhältnis m_0/m_B	Wirkungs- grad η_A
0.001	1.001	0.001
0.01	1.010	0.010
0.1	1.105	0.095
0.5	1.65	0.385
1.	2.72	0.582
1.594	4.93	0.647
2.	7.4	0.625
3.	20.1	0.524
4.	55.	0.299
5.	149.	0.169
6.	403.	0.089
8.	3000	0.021
10.	22 000	0.0045
57.	$6 \cdot 10^{24}$	$0.5 \cdot 10^{-21}$

Ist v_0 während der gesamten Brenndauer t_B konstant, so lässt sich (2.25) einfach integrieren und wir erhalten als Raketenformel

$$\Delta v = v_0 \ln \frac{m_0}{m_B} \quad (2.27)$$

mit m_0 als der Gesamtmasse der Rakete zum Zeitpunkt $t = 0$ und m_B als der Raketenmasse bei Brennschluss. Δv ist der Geschwindigkeitszuwachs der Rakete bzw. bei Beschleunigung aus der Ruhe die Geschwindigkeit am Ende der Beschleunigungsphase.

Verständnisfrage 12 Beim Übergang zu (2.25) wurde das Glied $dm dv$ vernachlässigt. Ist (2.26) damit identisch zu (2.24) ohne Reibung und Gravitationskraft oder nicht? Und was bedeutet diese Vereinfachung physikalisch, was mathematisch? Vergleichen Sie mit der im ersten Semester bei der startenden Rakete verwendeten Gleichung.

§ 184 Der Geschwindigkeitszuwachs Δv kann formal nahezu beliebig gesteigert werden, wenn das Verhältnis m_0/m_B groß genug wird. Allerdings ist dies zum einen aus technischen Gründen (den Treibstoff umschließende Struktur) nicht einfach, zum anderen wird der Wirkungsgrad für große Massenverhältnisse sehr klein, vgl. Tabelle 2.5.

§ 185 Als Wirkungsgrad einer Rakete wird das Verhältnis ihrer kinetischen Energie bei Brennschluss zur insgesamt im Treibstoff enthaltenen Energie definiert:

$$\eta = \frac{E_{\text{kin,B}}}{E_{\text{kin,\infty}}} = \frac{m_B v_B^2}{m_T v_\infty^2} \quad (2.28)$$

mit v_∞ als der Geschwindigkeit, die die ausströmenden Treibgase haben würden, wenn ihr gesamter Wärmeinhalt in die kinetische Energie des ausgestoßenen Gases verwandelt wäre. Würde man eine derartige ideale Rakete auf dem Prüfstand abbrennen, so würde keine Energie an die fest verankerte Rakete übertragen sondern alle Energie in die Ausströmung gehen.

§ 186 Bei der realen Rakete ist die Ausströmgeschwindigkeit v_0 geringer als v_∞ , so dass die kinetische Energie der Ausströmung gegeben ist als $E_{\text{kin,T}} = m_T v_0^2/2$. Der Wirkungsgrad (2.28) wird daher aufgespalten gemäß

$$\eta = \eta_I \eta_A \quad \text{mit} \quad \eta_I = \frac{v_0^2}{v_\infty^2} \quad \text{und} \quad \eta_A = \frac{m_B v_B^2}{m_T v_\infty^2}$$

als dem inneren und äußeren Wirkungsgrad. Der innere Wirkungsgrad gibt ein Maß dafür, welcher Teil der in den heißen Brennkammern enthaltenen Energie in gerichtete kinetische Energie der austretenden Gase umgewandelt wird. Er liegt zwischen 0.36 und 0.64 [68].

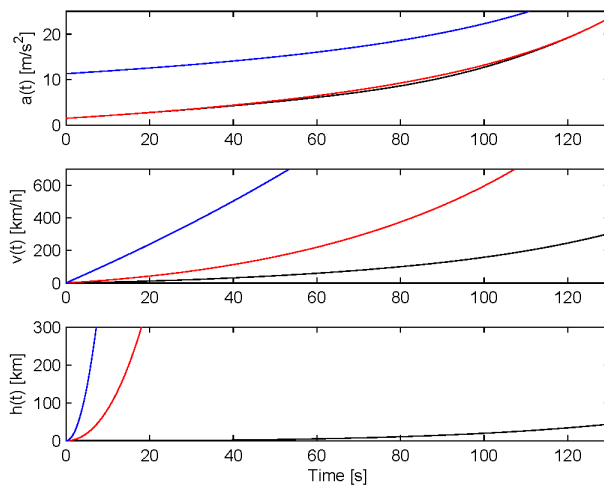


Abbildung 2.25: Raketentart; numerische Lösung für die erste Stufe einer Saturn V für verschiedene Näherungen: (*schwarz*) mit Reibungskraft und höhenabhängiger Gravitationskraft, (*rot*) ohne Reibungskraft, mit konstanter Gravitation, (*blau*) ohne Reibung und ohne Gravitation

Der äußere Wirkungsgrad gibt den Bruchteil der in den ausströmenden Raketengasen steckenden Energie, der in kinetische Energie der Rakete umgewandelt werden kann. Der äußere Wirkungsgrad ist Null, wenn die Rakete auf dem Prüfstand festgehalten wird; er würde eins, wenn in jeder Flugphase die Ausströmgeschwindigkeit ihrem Betrage nach gleich der momentanen Fluggeschwindigkeit v der Rakete wäre. In diesem Fall würde sich der Gasstrahl bezüglich eines raumfesten Systems in Ruhe befinden.

§ 187 Im realen Fall ist der Wirkungsgrad geringer, ein Teil der Energie steckt in der Geschwindigkeit, mit der die Rückstoßgase durch den Raum fliegen. Für konstante Ausströmgeschwindigkeit können wir die Raketenformel (2.27) einsetzen und erhalten für den äußeren Wirkungsgrad

$$\eta_A = \frac{(v_B/v_0)^2}{\exp(v_B/v_0) - 1} = \frac{\left(\ln \frac{m_0}{m_B}\right)^2}{\frac{m_0}{m_B} - 1}.$$

Tabelle 2.5 fasst die äußeren Wirkungsgrade für verschiedene Geschwindigkeits- bzw. Massenverhältnisse zusammen. Der optimale Wirkungsgrad von 0.647 ergibt sich für ein Massenverhältnis von 4.93 (vernünftige Annahme) und ein Geschwindigkeitsverhältnis von 1.594.

Luftleer, aber Gravitation

§ 188 Die Rakete im luftleeren und gravitationsfreien Raum kann vielleicht als Annäherung für Booster bei der Durchführung von Bahnmanövern betrachtet werden, die eigentliche Anwendung einer Rakete, den Start vom Erdboden aus, beschreibt sie jedoch nicht. Um diesen zu beschreiben müssen wir in der Bewegungsgleichung zusätzlich zur Schubkraft die Gravitation berücksichtigen und erhalten mit (2.26)

$$F = v_0\beta - g(h)$$

für den senkrechten Start; beim schiefen Schuss muss die Betrachtung vektoriell durchgeführt werden. Integration liefert (für konstantes v_0 und unter Vernachlässigung der Höhenabhängigkeit von g)

$$\Delta v = v_0 \ln \frac{m_0}{m_B} - gt_B$$

wobei sich die Zeit t_B aus der Masse des Treibstoffs und der Ausströmrate bestimmen lässt.

§ 189 Abbildung 2.25 erlaubt den Vergleich der verschiedenen Näherungen mit Hilfe der numerischen Lösung von (2.24) für die erste Stufe einer Saturn V Rakete [22]. Die schwarze Kurve gibt die vollständige Lösung (Reibung und höhenabhängige Gravitationskraft): bei

Brennschluss der ersten Stufe hat die Rakete eine Höhe von ca. 100 km erreicht (unteres Teilbild). Vernachlässigt man die Reibung (rote Kurve) so ändert sich an der Beschleunigung nur im mittleren Bereich der Flugbahn etwas: für kleine Zeiten ist die Geschwindigkeit noch so gering, dass die Reibung nur geringen Einfluss hat; für große Zeiten und damit große Flughöhen wird der Einfluss der Reibung ebenfalls wieder gering, da die Dichte abgenommen hat. Die scheinbar geringe Erhöhung der Beschleunigung hat jedoch einen starken Einfluss auf die Geschwindigkeit und die bei Brennschluss erreichte Flughöhe. Selbst diese Kurven sind keine vernünftige Annäherung an die allgemeine Lösung. Vernachlässigt man zusätzlich die Gravitation (blaue Kurve), so erhält man zwar zur Raketengleichung passende Werte – physikalisch sinnvoller wird die Lösung damit aber trotzdem nicht.

2.6.2 Mehrstufenprinzip

§ 190 Bei einer einstufigen Rakete ist das Massenverhältnis der begrenzende Faktor für die erreichbaren Geschwindigkeiten; eine optimale Ausnutzung des Wirkungsgrads würde ein Geschwindigkeitsverhältnis von ca. 1.6 liefern (vgl. Tabelle 2.5). Mit einer Ausströmgeschwindigkeit von 3 km/s ergibt sich dann eine Endgeschwindigkeit von 4.8 km/s, noch deutlich unter der ersten kosmischen Geschwindigkeit – damit viel zu gering, um einen Satelliten in ein Orbit zu bringen.

§ 191 Mit einer mehrstufigen Rakete kann man dieses Problem leicht umgehen. Anschaulich ist das einsichtig: eine mehrstufige Rakete zündet beim Start eine erste Raketenstufe, die weiteren Stufen sind in diesem Moment Bestandteil der Nutzlast. Ist diese ausgebrannt, so wird ihre Hülle abgeworfen. Damit reduziert sich die von der zweiten Stufe zu beschleunigende Masse. Dieser Vorgang wiederholt sich mit der zweiten (und gegebenenfalls vorhandenen weiteren) Stufe(n).

§ 192 Tabelle 2.6 gibt eine Illustration des Mehrstufenprinzips. Im oberen Teil ist eine Einstufenrakete betrachtet mit einer Startmasse m_0 von 50.68 t (das entspricht sinngemäß wieder den Maßen einer Saturn V wie in Abb. 2.25 – allerdings eben alle Stufen in eine kondensiert). Von der Gesamtmasse entfallen 42.2 t auf Treibstoff, 8.44 t auf die Rakete selbst und 40 kg auf die Nutzlast. Die Ausströmgeschwindigkeit beträgt 2.7 km/s. Damit ergibt sich nach der Raketengleichung (2.27) eine Geschwindigkeit von 4.8 km/s bei Brennschluss der Rakete, d.h. die Rakete erreicht nicht die für eine Kreisbahn notwendige Geschwindigkeit.

§ 193 Im unteren Teil der Tabelle stehen für Brennstoff, Nutzlast und Raketenstruktur die gleichen Massen zur Verfügung. Diese Massen werden jedoch wie bei der realen Saturn V Rakete auf drei Raketenstufen verteilt, wobei die erste Stufe alleine 95% der Masse der vorher betrachteten Einstufenrakete hat. Da in dieser ersten Stufe aber etwas weniger Treibstoffmasse vorhanden ist und die Restmasse der Rakete nach Brennschluss der ersten Stufe auch noch die Massen der anderen beiden Stufen umfasst, ergibt sich eine Geschwindigkeitszunahme von nur 4.21 km/s gegenüber den 4.8 km/s bei der Einstufenrakete.

§ 194 Die zweite Stufe, nun der Restmasse der ausgebrannten ersten Stufe entledigt, wird mit dieser Anfangsgeschwindigkeit gezündet und erreicht eine Geschwindigkeitszunahme um weitere 3.71 km/s, entsprechend einer Gesamtgeschwindigkeit von 7.92 km/s, d.h. die beiden unteren Stufen alleine könnten die Nutzlast zusammen mit der dritten Stufe bereits in eine Erdumlaufbahn bringen.

§ 195 Nach Absprennen der ausgebrannten zweiten Stufe wird die dritte Stufe gezündet. Nach deren Brennschluss ist eine Endgeschwindigkeit von 11.31 km/s erreicht. Während die Einstufenrakete bei gleicher Masse nicht einmal in der Lage gewesen wäre, einen Satelliten in ein Erdorbit zu befördern, kann mit der Dreistufenrakete eine Geschwindigkeit oberhalb der Fluchtgeschwindigkeit von 11.2 km/s erreicht werden, d.h. es können sogar planetare Missionen gestartet werden.

<i>Einstufenrakete:</i>		
Nutzlast		$m_S = 0.04 \text{ t}$
Treibstoff		$m_T = 42 - 20 \text{ t}$
Rakete		$m_R = 8.44 \text{ t}$
→ Masse beim Start		$m_0 = 50.68 \text{ t}$
Masse bei Brennschluss		$m_B = 8.48 \text{ t}$
→ Massenverhältnis		$m_0/m_B = 5.98$
Ausströmgeschwindigkeit		$v_0 = 2.7 \text{ km/s}$
→ Endgeschwindigkeit (2.27)		$v_R = 4.8 \text{ km/s}$
<i>Mehrstufenrakete:</i>		
Nutzlast		$m_S = 0.04 \text{ t}$
3. Stufe Rakete		$m_{R3} = 0.04 \text{ t}$
Treibstoff		$m_{T3} = 0.20 \text{ t}$
2. Stufe Rakete		$m_{R2} = 0.40 \text{ t}$
Treibstoff		$m_{T2} = 2.00 \text{ t}$
1. Stufe Rakete		$m_{R1} = 8.00 \text{ t}$
Treibstoff		$m_{T1} = 40 \text{ t}$
→ Gesamtmasse beim Start		$m_0 = 50.68 \text{ t}$
davon Gesamtmasse Rakete		$m_R = 8.44 \text{ t}$
davon Gesamtmasse Treibstoff		$m_T = 42.20 \text{ t}$
1. Stufe Masse beim Start = Gesamtmasse		$m_{01} = m_0 = 42.20 \text{ t}$
Masse bei Brennschluss		$m_{B1} = 10.68 \text{ t}$
Geschwindigkeitszuwachs		$\Delta v_1 = 4.21 \text{ km/s}$
Brennschlussgeschwindigkeit der 1. Stufe		$v_1 = 4.21 \text{ km/s}$
2. Stufe Masse bei Zündung der zweiten Stufe		$m_{02} = 2.68 \text{ t}$
Masse bei Brennschluss der zweiten Stufe		$m_{B2} = 0.68 \text{ t}$
Geschwindigkeitszuwachs		$\Delta v_2 = 3.71 \text{ km/s}$
Brennschlussgeschwindigkeit der zweiten Stufe $v_1 + \Delta v_2$		$v_2 = 7.92 \text{ km/s}$
3. Stufe Masse bei Zündung der dritten Stufe		$m_{03} = 0.28 \text{ t}$
Masse bei Brennschluss der dritten Stufe		$m_{03} = 0.28 \text{ t}$
Geschwindigkeitszuwachs		$\Delta v_3 = 3.39 \text{ km/s}$
Brennschlussgeschwindigkeit der dritten Stufe $v_1 + \Delta v_2 + \Delta v_3$..		$v_3 = v_B = 11.31 \text{ km/s}$

Tabelle 2.6: Vergleich Ein- und Dreistufenrakete, nach [68]

Ergänzung: Mehrstufenrakete formal

§ 196 Um zu einer formalen Beschreibung der Endgeschwindigkeit bei einer Mehrstufenrakete zu gelangen, betrachten wir eine Zweistufen-Rakete. Die erste Stufe hat die Masse $m_1 = m_{T1} + m_{R1}$ mit m_{T1} als der Masse des Treibstoffes und m_{R1} als der Restmasse der Struktur der ersten Stufe. Analog bezeichnet der Index 2 die Massen der zweiten Stufe (wobei bei einer vorhandenen Nutzlast deren Masse in m_{R2} mit enthalten ist). Nach der Raketen-gleichung (2.27) ergibt sich die Geschwindigkeit Δv_1 nach Brennschluss der ersten Stufe zu:

$$\Delta v_1 = v_{01} \ln \frac{m_{T1} + m_{R1} + m_{T2} + m_{R2}}{m_{R1} + m_{T2} + m_{R2}}. \quad (2.29)$$

§ 197 Die zweite Stufe m_2 wird nun von der leergebrannten ersten Stufe abgetrennt (Verlust der Masse m_{R1}). Nach Brennschluss der zweiten Stufe ergibt sich ein Geschwindigkeitszuwachs von

$$\Delta v_2 = v_{02} \ln \frac{m_{T2} + m_{R2}}{m_{R2}}. \quad (2.30)$$

Da die zweite Stufe bei ihrer Zündung bereits die durch (2.29) gegebene Geschwindigkeit Δv_1 erreicht hatte, ergibt sich für die Gesamtgeschwindigkeit nach Brennschluss der zweiten Stufe $v_{B2} = \Delta v_1 + \Delta v_2$.

§ 198 Vereinfachend nehmen wir an, dass bei beiden Stufen die Ausströmgeschwindigkeiten

gleich sind: $v_{01} = v_{02}$. Dann ergibt sich

$$v_{B2} = v_0 \ln \frac{(m_{T1} + m_{R1} + m_{T2} + m_{R2})(m_{T2} + m_{R2})}{(m_{R1} + m_{T2} + m_{R2})m_{R2}}.$$

Erweitert man den Bruch im Logarithmus mit $(m_{R1} + m_{R2})$, so ergibt sich nach Ausklammern, Ausmultiplizieren und Umformen

$$v_{B2} = v_0 \ln \frac{m_1 + m_2}{(m_{R1} + m_{R2})} + v_0 \ln \left(1 + \frac{m_{R1} m_{R2}}{m_{R2}(m_{R1} + m_{R2} + m_{T2})} \right). \quad (2.31)$$

Dabei stellt der erste Term auf der rechten Seite die Endgeschwindigkeit dar, die man nach der Raketenformel (2.27) für eine einstufige Rakete mit derselben Startmasse $m_1 + m_2$ und derselben Treibstoffmasse $m_{T1} + m_{T2}$ wie das gesamte Zweistufenaggregat erhalten hätte. Der zweite Term stellt den Geschwindigkeitsgewinn durch die Verwendung einer zweiten Stufe dar, dieser Term ist stets positiv.

§ 199 Setzt man insgesamt n Stufen aufeinander und trennt jeweils die unterste Stufe nach Brennschluss ab, so ergibt sich für die Endgeschwindigkeit der letzten Stufe einschließlich der Nutzlast: $v_B = \sum \Delta v_i$. Für alle Raketenstufen gilt die Raketenformel (2.27). Unter der Voraussetzung, dass die Ausströmgeschwindigkeit v_0 für alle Stufen gleich ist, ergibt sich

$$v_B = v_0 \ln \left(\frac{m_{01}}{m_{B1}} \frac{m_{02}}{m_{B2}} \dots \frac{m_{0n}}{m_{Bn}} \right).$$

mit den Größen m_{0i} und m_{Bi} als den Gesamtmassen vor Zünden bzw. nach Brennschluss der i -ten Stufe, gegeben durch

$$\begin{aligned} m_{01} &= m_N + \sum_{i=2}^n (m_{Ri} + m_{Ti}) + (m_{R1} + m_{T1}), \\ m_{B1} &= m_N + \sum_{i=2}^n (m_{Ri} + m_{Ti}) + m_{R1}, \\ m_{02} &= m_N + \sum_{i=3}^n (m_{Ri} + m_{Ti}) + (m_{R2} + m_{T2}), \\ &\vdots \\ m_{Bn} &= m_N + m_{Rn}. \end{aligned}$$

Dabei ist m_N die Masse der Nutzlast. Die aus diesen Massen gebildete, als Argument im Logarithmus von (2.31) auftretende Produktkette

$$\frac{M_0}{M_B} = \prod_{i=1}^n \left(\frac{m_{0i}}{m_{Bi}} \right)$$

wird als das totale Massenverhältnis bezeichnet. Dann lässt sich (2.31) analog zur Raketenformel (2.27) auch in der Form

$$v_B = v_0 \ln \frac{M_0}{M_B}$$

schreiben.

§ 200 Die Raketenformel (2.27) erlaubt nur eine ungefähre Abschätzung der Geschwindigkeit bei Brennschluss der Rakete. In der Realität müssen die Reibung in der Erdatmosphäre und die (mit der Höhe abnehmende) Gravitationskraft berücksichtigt werden – und diese Einflüsse sind, wie in Abb. 2.25 zu erkennen, nicht gering.

§ 201 Allerdings gibt es auch eine natürliche Starthilfe: die Bewegung des Startplatzes verschafft der Rakete in einem raumfesten System bereits eine Anfangsgeschwindigkeit. Für planetare Missionen ist die Starthilfe die Rotation der Erde um die Sonne. Die Umlaufgeschwindigkeit beträgt $v_U = 29.8$ km/s, die am Ort der Erde benötigte Entweichgeschwindigkeit

aus dem Sonnensystem v_e^s 46.4 km/s . Nutzt man die bereits durch die Rotation der Erde um die Sonne vorgegebene Geschwindigkeit, so reduziert sich die dem Satelliten bzw. der Rakete zusätzlich zu erteilende Geschwindigkeit auf $\Delta v = v_e^s - v_u = 16.6$ km/s. Dies gilt natürlich wenn der Start in der Bewegungsrichtung der Erde erfolgt. Ein Start in die Gegenrichtung ist praktisch unmöglich, da dann die Eigengeschwindigkeit der Erde zusätzlich aufgehoben werden müsste, der Rakete also eine Gesamtgeschwindigkeit von 76.2 km/s zu erteilen wäre. Für einen Start von Erdsatelliten ist der Effekt der Eigenrotation der Erde geringer, da die Kreisbahngeschwindigkeit 7.8 km/s beträgt, die Umlaufgeschwindigkeit am Erdboden aber nur 0.46 km/s.

2.6.3 Transferbahnen (Hohmann-Bahnen)

§ 202 Eine normale Raketen besitzt keine ausreichende Schubkraft, um z.B. einen Kommunikationssatelliten in ein geostationäres Orbit zu bringen. Wird mit dem Space Shuttle gestartet,²¹ so kann bei sehr leichten Satelliten nur eine Maximalhöhe von ca. 1 000 km erreicht werden, realistischere Höhen liegen eher zwischen 400 und 600 km. Um den Satelliten dann in ein höheres Orbit zu überführen, benötigt man zusätzlichen Schub.²² Wie dieses Verfahren vom energetischen Standpunkt optimiert werden kann, wird durch die Hohmann-Bahnen beschrieben. Andere Transferbahnen existieren ebenfalls, diese sind jedoch in der Regel wesentlich energieaufwendiger.

§ 203 Hohmann hat die nach ihm benannten Bahnen bereits vor dem 1. Weltkrieg unter Anwendung der Gesetze der klassischen Himmelmechanik berechnet. Sein Ziel war zu ermitteln, wie groß, wie schwer und wie leistungsfähig ein raketentriebenes Raumschiff sein müsste, um auf Sonnen umrundenden Ellipsenbahnen bei geringstem Energieaufwand zu anderen Planeten zu gelangen. Hohmann veröffentlichte diese Untersuchungen 1925 unter dem Titel ‘Die Erreichbarkeit der Himmelskörper’ (Oldenburg, München) mit den Kapiteln: Loslösung von der Erde; Rückkehr zur Erde; Freie Fahrt im Raum; Umfahrung anderer Himmelskörper; und: Landung auf anderen Himmelskörpern. Wernher von Braun kommentierte dazu: ‘Seine Untersuchungen schlossen nicht nur das primäre Problem des Verlassens des Schwerefeldes der Erde ein, sondern auch die delikate Aufgabe des Wiedereintritts in die Erdatmosphäre mit super-orbitalen Rückkehrgeschwindigkeiten’. Die wichtigsten theoretischen Grundlagen der Manöverierung von Raumsonden wurden also bereits gelegt lange bevor sich die ersten Möglichkeiten zur technischen Realisierung solcher hochfliegenden Pläne abzeichneten.

Hohmann-Bahnen

§ 204 Hohmann-Bahnen bestimmen den energetisch günstigsten Übergang zwischen zwei Orbits. Hierbei kann es sich um den Übergang von einer niedrigen Erdumlaufbahn in ein geostationäres Orbit handeln oder um den Übergang von einer Bahn um die Erde auf eine um einen anderen Planeten. Als Näherung wollen wir das Problem soweit vereinfachen, dass die Anziehungskraft auf den Satelliten nur von einem Zentralkörper ausgeht (also z.B. zwei Satellitenbahnen um die Erde oder der Übergang von der Erd- auf die Marsbahn ohne

²¹Diese Idee war vor ganz langer Zeit einmal eine der Begründungen für das Space Shuttle – die Existenz einer wieder verwendbaren Startbasis [170]. Allerdings wurde das Shuttle Programm immer teurer; auch standen nach den Verlusten von Challenger und Columbia kaum noch Starts an. Daher wird das Shuttle heute nicht mehr zum Satellitentart verwendet – eventuell mit der Ausnahme des militärischen Shuttles Atlantis für Spionage- oder andere Militärsatelliten. Satellitenstarts sind heute wieder nahezu ausschließlich Domäne der Raketen. Das Space Shuttle durfte ursprünglich auch Satelliten mit einer angedockten Flüssigtreibstoff-Raketenstufe transportieren. Nach der Explosion der Challenger beim Start wurde diese Politik überdacht, was z.B. für den Start der Jupiter-Mission Galileo [457] und der interplanetaren Mission Ulysses [474] gravierende Konsequenzen hatte. So musste auf Grund der schwächeren Feststoffrakete bei Galileo ein mehrfaches Swing-By Manöver geflogen werden, vgl. Abb. 2.34 und Abschn. 2.7.2.

²²Transferbahnen sind nicht nur beim Start mit Hilfe des Space Shuttle erforderlich – dort ist das Auftreten einer Kreis- oder Ellipsenbahn in niedrigem orbit nur am offensichtlichsten. Auch beim Start mit einer mehrstufigen Rakete kann, wie in § 194 gesehen, eine stabile Zwischenbahn erreicht werden.

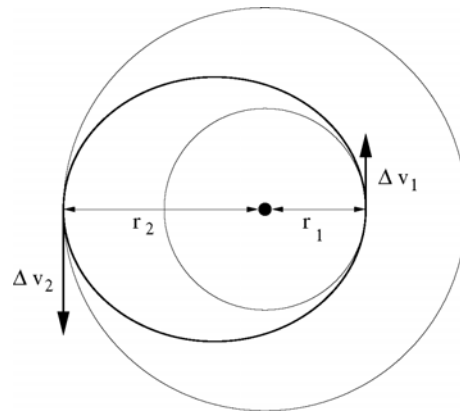


Abbildung 2.26: Hohmann-Bahn als Übergangselipse zwischen zwei kreisförmigen Orbits

Einschwenken in eine Umlaufbahn um diesen Planeten, so dass die Anziehungskraft der Planeten vernachlässigt werden kann und nur die Sonne der Zentralkörper ist). Zusätzlich wird angenommen, dass es sich um kreisförmige Bahnen handelt, die alle in einer Ebene liegen: für Bahnen zwischen den Planeten stellt dies keine bedeutende Einschränkung dar. Um einen Satelliten aus dieser Ebene zu katapultieren, bedarf es jedoch eines größeren Aufwands – bei Ulysses z.B. durch ein Swing-By Manöver am Jupiter realisiert (siehe auch Abb. 2.33).

§ 205 Eine Möglichkeit des Überganges zwischen zwei kreisförmigen Bahnen mit den Radien r_1 und r_2 ist eine elliptische Trajektorie, vgl. Abb. 2.26. Diese Übergangselipse wird als Hohmann-Ellipse oder Hohmann-Bahn bezeichnet. Ihre große Halbachse a ergibt sich zu $a = \frac{1}{2}(r_1 + r_2)$, da die Bahn in ihrem Perihel bzw. Perigäum die innere, in ihrem Aphel bzw. Apogäum die äußere Kreisbahn berührt. Nach der Binet'schen Gleichung (2.17) ergibt sich dann für jeden Punkt der Bahn die Geschwindigkeit zu

$$v^2 = 2\mu \cdot \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_1 + r_2} \right).$$

Damit lassen sich die Geschwindigkeiten im Perihel r_1 und Aphel r_2 bestimmen zu

$$v_P = \sqrt{\frac{\mu}{r_1}} \sqrt{\frac{2}{r_1/r_2 + 1}} \quad \text{und} \quad v_A = \sqrt{\frac{\mu}{r_2}} \sqrt{\frac{2}{1 + r_1/r_2}}.$$

§ 206 Erfolgt der Start nun von der inneren Kreisbahn aus in Richtung der Umlaufbewegung des Raumfahrzeuges, so hat der Körper bereits vor dem Start eine Geschwindigkeit, die der Kreisbahngeschwindigkeit $v_{K1} = \sqrt{\mu/r_1}$ auf diesem Orbit entspricht. Zum Übergang auf die Hohmann-Bahn ist dann eine Geschwindigkeitsänderung $\Delta v_1 = v_1 - v_{K1}$ erforderlich, wobei gemäß der Definition der Bahn Δv_1 tangential zur Kreisbahn ist. Die Geschwindigkeitsänderung durch das Feuern der Schubdüsen erfolge instantan, d.h. in einer Zeit, die klein gegenüber der Umlaufzeit ist. Dann erhält man die Geschwindigkeitsänderung zu

$$\Delta v_1 = \sqrt{\frac{\mu}{r_1}} \left(\sqrt{\frac{2}{r_1/r_2 + 1}} - 1 \right).$$

§ 207 Mit diesem Geschwindigkeitszuwachs kann das Raumfahrzeug die elliptische Bahn bis zur Kreisbahn mit r_2 durchlaufen. Da seine Geschwindigkeit an diesem Punkt kleiner ist als die Kreisbahngeschwindigkeit beim Radius r_2 , würde das Raumfahrzeug auf der zweiten Hälfte der Ellipse wieder nach innen laufen. Daher muss in diesem Punkt nochmals ein Geschwindigkeitszuwachs erreicht werden, der gegeben ist durch

$$\Delta v_2 = \sqrt{\frac{\mu}{r_2}} \left(1 - \sqrt{\frac{2}{1 + r_1/r_2}} \right).$$

Planet	Flugzeit/Jahre
Merkur	0.29
Venus	0.40
Mars	0.71
Jupiter	2.73
Saturn	6.05
Uranus	16.1
Neptun	30.6
Pluto	45.5

Tabelle 2.7: Flugzeiten für Hohmann-Übergänge zu anderen Planeten

§ 208 Der gesamte Geschwindigkeitszuwachs ergibt sich als die Summe der beiden zu

$$\Delta v = v_{K1} \left(1 - \sqrt{\frac{r_1}{r_2}} \right) \left[\sqrt{\frac{2}{r_1/r_2 + 1}} \left(1 + \sqrt{\frac{r_1}{r_2}} \right) - 1 \right].$$

Diese Gleichung ist plausibel: Betrachtet man den Fall $r_1 \rightarrow r_2$, so geht Δv gegen Null, d.h. um auf derselben Kreisbahn zu bleiben, ist keine Geschwindigkeitsänderung nötig. Umgekehrt ergibt sich für $r_2 \rightarrow \infty$ ein $\Delta v \rightarrow v_{K1}(\sqrt{2} - 1)$. Das ist aber gerade die Fluchtgeschwindigkeit eines Körpers, der sich in einer Höhe r_1 befindet.

§ 209 Da wir wieder annehmen, dass die Geschwindigkeitsänderungen innerhalb vernachlässigbar kleiner Zeitintervalle stattfinden, können wir für diese kurze Dauer die Gravitation vernachlässigen und die benötigte Treibstoffmenge nach der Raketenformel (2.27) abschätzen.

Verständnisfrage 13 (2.27) ohne Gravitation – ist die hier überhaupt anwendbar? Oder ist sie zumindest unter bestimmten Bedingungen anwendbar?

§ 210 Will man von der äußeren Kreisbahn auf die innere gelangen, so muss der Raumflugkörper jeweils um eine Geschwindigkeit Δv_2 und Δv_1 verzögert werden. Dabei wird exakt die gleiche Energie benötigt, wie beim umgekehrten Übergang von der inneren Bahn in die äußere, obwohl der Übergang hier von einer Bahn größerer zu einer Bahn geringerer Gesamtenergie erfolgt. Daher ist es sinnvoll, zur Kennzeichnung des Gesamtenergieverbrauchs eine charakteristische Geschwindigkeitsänderung Δv_{char} einzuführen mit

$$\Delta v_{\text{char}} = |\Delta v_1| + |\Delta v_2|.$$

Verständnisfrage 14 Wo bleibt die Energie?

§ 211 Die Flugdauer zwischen zwei Orbits ist gleich der halben Umlaufzeit auf der Hohmann-Ellipse. Durch Einsetzen der Halbachse a in das dritte Kepler'sche Gesetz ergibt sich

$$\Delta t = \frac{P_1}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{1 + r_2/r_1}{2} \right)^3}.$$

Darin ist $P_1 = 2\pi\sqrt{r_1^3/\mu}$ die Umlaufperiode auf der inneren Bahn, für die Erde ist diese $P_1 = 1$ Jahr. Für Hohmann-Übergänge zu den anderen Planeten ergeben sich die in Tabelle 2.7 gegebenen Zeiten. Die Flugzeit zum Neptun beträgt z.B. 30 Jahre. Das ist wesentlich länger als die 11 Jahre, die Voyager für diese Strecke benötigt hat, da Hohmann-Bahnen nur für ein Einschwenken auf das andere Orbit entscheidend sind, um einfach an einem Planeten vorbeizufiegen, muss nur die Geschwindigkeit ausreichend groß sein (bei Voyager Entweichgeschwindigkeit aus dem Sonnensystem). Hier deutet sich bereits eine Möglichkeit an, einen schnelleren Übergang zu erreichen, der allerdings energetisch aufwendiger ist.

Zwischenrechnung 9 Schätzen sie den Energiebedarf für Hohmann-Bahnen zum Jupiter, zum Neptun und für das Entweichen aus dem Gravitationsfeld der Sonne ab, um de hier für Voyager getroffene Aussage zu quantifizieren.

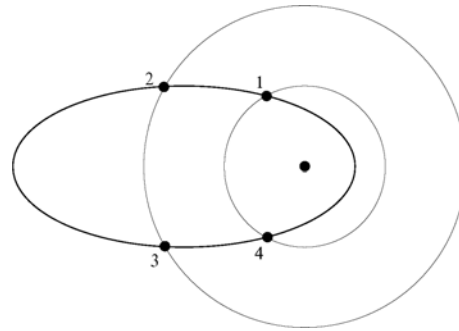


Abbildung 2.27: Übergangsbahn aus Ellipsenbögen

§ 212 Für Erdsatelliten sind Hohmann-Bahnen die gebräuchliche Form des Übergangs. Wie ein Blick auf die Liste der Wettersatelliten in Tab. ?? zeigt, ist der Übergang vom mit der eigentlichen Rakete erreichten Zwischenorbit in den Transferorbit bzw. der Übergang aus diesem in den Zielorbit ein größeres Verlustrisiko als z.B. Explosion der Rakete beim Start. Ein sehr prominenter Verlust im Transfer ist LandSat 6.

Andere Transferbahnen

§ 213 So lange das Verhältnis r_1/r_2 von Ziel- zu Ausgangsradius kleiner als 12 ist, ist die Hohmann-Bahnen energetisch am günstigsten. Dieses Verhältnis mag groß erscheinen, bei planetaren Übergängen ließe sich damit z.B. ein Orbit hinter der Saturnbahn erreichen, aber der Übergang benötigt wie bereits in § 211 angedeutet sehr viel Zeit. So würde selbst zu unserem nächsten Nachbarn, Mars, der Flug noch mehr als 8 Monate dauern, zum Saturn wären es gar 6 Jahre.

§ 214 Der zeitintensivste Teil der Hohmann-Bahn ist die (nach dem zweiten Kepler'schen Gesetz) langsame Annäherung an das Apogäum der Übergangsellipse, das gleichzeitig der Ausgangspunkt für die äußere Kreisbahn ist. Ein schnellerer Übergang sollte daher gerade an dieser Stelle größere Geschwindigkeiten haben. Dazu müsste man dem Raumfahrzeug am Startpunkt der Übergangsbahn auf der inneren Kreisbahn einen stärkeren Schub erteilen (und damit mehr Treibstoff verbrauchen), als er für eine Hohmann-Bahn erforderlich ist. Dann liegt das Apogäum der Übergangsellipse hinter der angestrebten äußeren Bahn. Also muss am Ort des äußeren Orbits relativ stark abgebremst werden, um auf die gewünschte Umlaufbahn einzuschwenken. Die Geschwindigkeitsänderung in diesem Punkt ist dabei nicht, wie beim Hohmann-Übergang, tangential zur Bahn. Die Zeit zum Erreichen des äußeren Orbits wird bei dieser Art von Übergängen um so geringer, je exzentrischer die Übergangsellipse ist. Allerdings steigt die benötigte Treibstoffmenge an, lediglich in bestimmten Abstandsverhältnissen gibt es Einzelfälle, in denen dieser Übergang energetisch günstiger ist als eine Hohmann-Bahn.

Verständnisfrage 15 Wie bestimmen sich diese günstigen Abstandsverhältnisse? Stellen Sie eine allgemeine Regel auf. Ergeben sich für Erdsatelliten interessante Übergänge?

§ 215 So wie beim Übergang vom Transfer-Orbit zur äußeren Bahn eine nicht-tangentiale Geschwindigkeitsänderung erfolgt, kann man auch beim Übergang von der inneren auf die Übergangsbahn eine nicht-tangentiale Geschwindigkeitsänderung vornehmen. Dadurch verkürzt sich die Länge der Übergangsbahn nochmals beträchtlich, vgl. Abb. 2.27.

§ 216 Für große Verhältnisse von r_1/r_2 oberhalb 11.94 ist die Hohmann-Bahn nicht mehr verbrauchsoptimal, dann erfolgt ein verbrauchsoptimaler Übergang mit Hilfe von drei Impulsen [210]. Dabei erhält der Raumflugkörper anfangs einen zu starken Impuls, der ihn in eine extrem exzentrische Übergangsellipse mit einem Apogäum hinter der gewünschten Zielbahn befördert. Im Apogäum dieser Übergangsbahn wird nochmals ein Vorwärtsschub erteilt, der

die Ellipse aufweitet und zu einem Perigäum auf der Bahn des Zielplaneten führt. In diesem Perigäum wird Gegenschub gegeben, damit sich die Ellipsenbahn zu einer Kreisbahn verkleinert.

Verständnisfrage 16 Können Sie anschaulich und formal begründen, warum Hohmann Bahnen bei zu großen Abstandsverhältnissen ungünstig werden?

§ **217** Bisher haben wir immer kurze Schubimpulse betrachtet. Ein völlig anderes Konzept ergibt sich jedoch, wenn man eine kontinuierliche Beschleunigung annimmt. Ionenraketen [68, 160, 208] oder noch moderner Sonnensegel [4, 387, 504, 746] sollten während der gesamten Reise mit kontinuierlichem Schub arbeiten. Dann ergibt sich eine nach außen immer weiter werdende Spiralbahn um das Gravitationszentrum. Diese Bahn und für planetare Missionen erforderliche Manöver werden z.B. in [68] diskutiert.

Zwischenrechnung 10 In [429] wird die Aussage “If launched in 2010 such a probe could overtake Voyager 1, the most distant spacecraft bound for interstellar space, in 2018 going as far in eight years as the Voyager will have journeyed in 41 years.” gemacht. Schätzen Sie ab, ob diese Annahme realistisch ist.

Verständnisfrage 17 Geometrische Nachfrage: lässt sich die Spirale einfach klassifizieren (z.B. archimedisch, logarithmisch) oder welche Gleichung erhalten Sie? Ist dies eine Umkehrung der bei der Abbremsung durch Reibung entstehenden Spiralbahn?

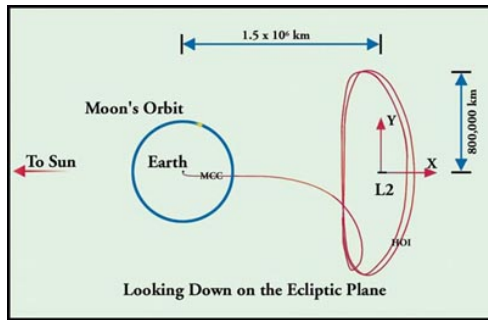
Reise zu anderen Planeten

§ **218** Im Vorangegangenen sind die Transferbahnen zwischen zwei Satellitenorbits dargestellt worden. Diese Betrachtung ist wesentlich vereinfacht gegenüber der Reise von der Erde zu einem anderen Planeten oder auch nur zum Mond. Beim Übergang von einem Satellitenorbit zu einem anderen müssen nur zwei (bzw. beim Drei-Impulsübergang drei) Geschwindigkeitsänderungen vorgenommen werden, ansonsten fällt der Satellit seinen Weg alleine.

§ **219** Für die Reise von der Erde zu einem anderen Planeten sind jedoch noch eine Anzahl zusätzlicher Punkte zu beachten:

1. Bei Reisen zwischen den Planeten ist der Zentralkörper die Sonne. Bevor wir unsere Raumsonde auf eine Übergangselipse im Schwerefeld der Sonne schicken können, müssen wir sie erst aus dem Schwerefeld der Erde in ein Orbit heben, das ähnlich dem der Erde um die Sonne läuft. Die erste Stufe zum Erreichen eines anderen Planeten besteht also darin, der Raumsonde die Fluchtgeschwindigkeit zum Verlassen des Anziehungsbereiches der Erde zu erteilen.
2. Von dieser Bahn aus lässt sich ein einfacher Hohmann-Übergang auf die Bahn des anderen Planeten vornehmen. Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass der Planet auch zu der Zeit, an der unsere Raumsonde seine Bahn erreicht, am entsprechenden Ort sein muss. Aus dieser Randbedingung erklärt sich, warum es bei Missionen zu anderen Planeten stets so genannte Startfenster gibt, d.h. Zeitbereiche, während derer ein Start insofern sinnvoll ist, als dass die Raumsonde nicht nur die Bahn des zu besuchenden Planeten, sondern auch den Planeten selbst erreicht.
3. Die Sonde befindet sich jetzt auf der Bahn des Planeten, nicht aber auf einer Bahn um den Planeten herum. Jetzt muss eine Umkehrung des ersten Schritts erfolgen und die Sonde muss auf eine Bahn um den Zielplaneten einschwenken, d.h. sie muss sich aus dem Schwerefeld der Sonne in das des Zielplaneten überführt werden.
4. Nachdem sich die Sonde nun in einer Bahn um den Zielplaneten befindet, können wir diesen vermessen (z.B. die Radarvermessung der Venus durch Magellan) oder wir können die Sonde bzw. eine Landekapsel der Sonde auf die Planetenoberfläche senden. Für eine weiche Landung stellt die Abbremsung das Hauptproblem dar, hier muss gleichsam ein Startvorgang mit umgekehrter Zeitrichtung durchgeführt werden. Wichtig ist dabei auch der korrekte Eintritt in die Atmosphäre des Planeten, um ein Verglühen zu verhindern (gute Diskussion z.B. in [160]).

Abbildung 2.28: Halo Orbit um einen Lagrange Punkt (in diesem Fall L2 hinter der Erde wie für das James Webb Telescope vorgesehen) [685]



- Die Sonde/Landekapsel hat dem Zielplaneten Proben entnommen, die zur Erde zurück gebracht werden sollen. Damit muss der gesamte Vorgang von (1) bis (4) erneut durchlaufen werden, jetzt jedoch haben Erde und Zielplanet getauschte Rollen. Bei einer Rückführung erweist es sich als ausgesprochen hilfreich, auf das bereits von Hohmann vorgeschlagene und in den Apollo-Mondlandungen verwirklichte Konzept des Beibootes zurück zu greifen. Die Idee dabei ist, nicht die komplette Raumsonde zu landen, sondern nur einen möglichst kleinen Teil der Sonde, der Lander. Der Vorteil ist offensichtlich: der Lander benötigt für seinen Start vom Zielplaneten wesentlich weniger Treibstoff als die ganze Raumsonde benötigen würde.

Zusammenfassung

§ 220 Bei einer Rakete handelt es sich um einen Körper veränderlicher Masse, der durch eine konstante Kraft beschleunigt wird. Die bei dieser Beschleunigung erreichbare Endgeschwindigkeit bestimmt sich aus der Ausströmgeschwindigkeit der Verbrennungsgase und dem Verhältnis der Massen bei Start und Brennschluss (Raketengleichung). Das Mehrstufenprinzip erlaubt es, durch geschickte Verteilung der Massen von Struktur und Treibstoff auf wesentlich höhere Geschwindigkeiten zu beschleunigen, als es mit einer einfachen Rakete möglich wäre, da die folgenden Stufen jeweils nicht mehr die leere Hülle der vorhergehenden Stufen beschleunigen müssen. Energetisch günstige Übergänge zwischen zwei Satelliten- oder Planetenbahnen lassen sich durch Übergangselipsen (Hohmann-Bahnen) realisieren.

2.7 Ergänzung: Spezielle Bahnen

§ 221 Dieser Abschnitt ist für die Erdfernerkundung nicht relevant, mag aber vielleicht einige von Ihnen aus technischen Gründen interessieren; insbesondere, da die Bahnen einerseits physikalisch anschaulich sind (Lagrange-Punkt), andererseits mit bekannten Missionen (planetares Billard bei Voyager) verbunden sind.

2.7.1 Lagrange-Punkte

§ 222 Die Bahnen von z.B. ISEE-3 [440], SOHO [613, 357] oder ACE [272] sind ein klassisches Beispiel für ein Dreikörperproblem. Diese Raumsonde befindet sich am Librationspunkt zwischen Sonne und Erde, d.h. am Ort von ISEE-3 herrscht ein Gleichgewicht zwischen der Anziehung durch die Sonne und der durch die Erde. Praktisch wird diese Bahn durch ein Halo-Orbit um den Lagrange-Punkt herum realisiert: würde sich die Sonde direkt im Lagrange-Punkt befinden, so wäre aufgrund der starken solaren Radiostrahlung eine Kommunikation nicht möglich. Der Orbit um den Lagrange-Punkt herum dient auch gleichzeitig der Stabilisierung der Sonde. Außerdem lassen sich auf diese Weise mehrere Satelliten um den Lagrange-Punkt verankern (z.Z. mindestens ACE und SOHO). Auch um den Lagrange Punkt hinter der Erde wird zur Stabilisierung ein entsprechendes Halo Orbit geflogen, siehe Abb. 2.28.

§ **223** Formal scheint sich der Lagrange-Punkt aus dem Gleichgewicht zwischen der Anziehung der Erde und der der Sonne berechnen zu lassen. Mit R als dem Abstand zwischen Sonne und Erde ergibt sich der Abstand r dieses Punktes von der Erde wegen

$$F_E = F_\odot \quad \rightarrow \quad \frac{m_s M_E \gamma}{r^2} = \frac{m_s M_\odot \gamma}{(R-r)^2}.$$

zu

$$r = \frac{R \sqrt{\frac{M_E}{M_\odot}}}{1 + \sqrt{\frac{M_E}{M_\odot}}} \approx r = 266\,084 \text{ km}.$$

Stabil ist dieser Punkt in der so diskutierten Form nicht, da eine kleine Auslenkung den Satelliten stets in Richtung des Körpers stürzen lassen würde, in dessen Richtung er ausgelenkt wurde. Außerdem würde der Satellit aufgrund des etwas geringeren Abstandes zur Sonne eine etwas kürzere Umlaufzeit haben und so langsam von der Linie Sonne–Erde weg driften.²³

§ **224** Allerdings ist die obige Betrachtung zum Lagrange-Punkt physikalisch auch nicht korrekt, da wir es mit einem rotierenden Bezugssystem zu tun haben: die Verbindungsachse Erde–Sonne rotiert um den gemeinsamen Massenmittelpunkt; dieser ist allerdings nur leicht gegen den Massenmittelpunkt der Sonne versetzt. Das rotierende Bezugssystem bringt seine eigenen Probleme – auch als Scheinkräfte bezeichnet – mit sich. Außerdem müssen wir das Problem als echtes Dreikörperproblem lösen, um auch ein Gefühl für die Stabilität des Lagrange-Punktes zu entwickeln.

Verständnisfrage 18 Versuchen Sie, anschaulich zu erklären, welchen Einfluss die Zentrifugalkraft beim Aufhängen eines Satelliten im Lagrange-Punkt hat. Spielt die Corioliskraft eine Rolle?

§ **225** Nehmen wir als Bezugssystem ein kartesisches Koordinatensystem mit dem Ursprung im Massenmittelpunkt des Systems Sonne–Erde und der x -Achse entlang der gemeinsamen Verbindungslinie.²⁴ Zur Herleitung der Bewegungsgleichung seien jetzt die Einheiten von Masse, Entfernung und Zeit so gewählt, dass $\gamma(M+m)$, der konstante Abstand zwischen den beiden schweren Körpern und die Gravitationskonstante γ gleich 1 gesetzt werden.²⁵ Aus Keplers drittem Gesetz ergibt sich, dass die konstante Winkelgeschwindigkeit n der beiden schweren Körper in einem Inertialsystem ebenfalls gleich 1 ist. In diesen Einheiten ist m das Verhältnis der kleineren Masse zur Summe der beiden Massen. Die Abstände der Massen M und m vom Massenschwerpunkt sind dann m und $(1-m)$. Das Bezugssystem sei so gewählt, dass es mit der Winkelgeschwindigkeit $\omega = 1$ um den Massenschwerpunkt in der Bahnebene der beiden schweren Körper rotiert. Dann befinden sich die beiden schweren Massen m und M stets an festen Punkten auf der x -Achse.

§ **226** Die Bewegung einer Testmasse am Punkt (x, y) ist mit diesen Abkürzungen gegeben durch die Bewegungsgleichung

$$\frac{d^2x}{dt^2} - 2 \frac{dy}{dt} = x - \frac{(1-m)(x-m)}{r_1^3} - \frac{m(x-1+m)}{r_2^3} \quad \text{und}$$

²³Diesen Effekt nutzt man bei den beiden Stereo Satelliten [500] aus: sie befinden sich in leicht elliptischen Orbits in der Nähe von 1 AU; der eine fällt langsam hinter der Erde zurück, der andere eilt ihr etwas voraus. Dadurch entsteht eine Konstellation, in der sich beide Satelliten zunehmend voneinander entfernen und so die gleichzeitige Beobachtung an unterschiedlichen Orten im interplanetaren Raum erlauben.

²⁴Eingeschränktes Dreikörperproblem: die Testmasse wird als klein gegen die beiden anderen Massen betrachtet, so dass der Massenmittelpunkt aller drei Massen mit dem Massenmittelpunkt der beiden großen Massen zusammen fällt.

²⁵Dimensionslose Größen sind bei der (analytischen) Betrachtung komplexerer Probleme immer hilfreich. Aus praktischen Gesichtspunkten haben sie den Vorteil, dass man dann nicht so viele Konstanten mit sich rumschleppt. Physikalisch lassen sich die dimensionslosen Größen auch so interpretieren, dass man sie als charakteristische Größen des Systems betrachtet und alle anderen Größen in Einheiten dieser charakteristischen Größen angibt. Beim einfachen Federpendel bedeutet die Reduktion der Differentialgleichung $\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0$ auf die dimensionslose Variante $\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0$ nur, dass man $\omega_0 = 1$ setzt und damit alle Zeiten in Einheiten der Periodendauer angegeben werden.

$$\frac{d^2y}{dt^2} + 2 \frac{dx}{dt} = y - \frac{(1-m)y}{r_1^3} - \frac{my}{r_2^3}$$

mit $r_1 = \sqrt{(x+m)^2 + y^2}$ und $r_2 = \sqrt{(x-1+m)^2 + y^2}$ als den Abständen der Testmasse von den Massen M und m . Die Bewegungsgleichung ist ähnlich der Bewegungsgleichung eines geladenen Teilchens in einem konstanten homogenen Magnetfeld und einem elektrischen Feld. Der zweite Term auf der linken Seite gibt die Coriolisbeschleunigung, auf der rechten Seite stehen die Zentrifugalbeschleunigung und die Gravitationskraft der beiden schweren Massen. Diese Terme sind Funktionen nur von (x, y) und können aus einer Potentialfunktion W abgeleitet werden mit

$$W(x, y) = -\frac{1}{2}(x^2 + y^2) - \frac{1-m}{r_1} - \frac{m}{r_2}.$$

Damit werden die Bewegungsgleichungen zu

$$\frac{d^2x}{dt^2} - 2 \frac{dy}{dt} = -\frac{\partial W}{\partial x} \quad \text{und} \quad \frac{d^2y}{dt^2} + 2 \frac{dx}{dt} = -\frac{\partial W}{\partial y}.$$

§ 227 Multiplikation mit $2dx/dt$ bzw. $2dy/dt$ und anschließende Integration über die Zeit liefert $\frac{1}{2}(x^2 + y^2) = -W(x, y) + C$, wobei sich die Integrationskonstante C aus den Anfangsbedingungen ergibt. Diese Herleitung ist analog zu der Herleitung der Energieerhaltung für einen Massenpunkt in einem wirbelfreien Kraftfeld. In diesem Fall ist die Jacobi-Konstante C jedoch nicht die Energie, da wir uns in einem rotierenden Bezugssystem befinden. Zu beachten ist, dass die Corioliskraft keine Arbeit leistet und damit die Erhaltungsgleichung nicht beeinflusst. Dennoch ist die Corioliskraft für die Bewegung des Testkörpers von entscheidender Bedeutung.

§ 228 Da die kinetische Energie niemals negativ werden kann, ergibt sich aus der Erhaltungsgleichung, dass die Bewegung nur in den Bereichen der (x, y) -Ebene erfolgen kann, in denen gilt $W(x, y) \leq C$. Diese Einschränkungen hängen von der Jacobi-Konstante und damit von den Anfangsbedingungen ab. Für $W = C$ wird die Grenze eines erlaubten Bereiches definiert, die sogenannten Hill's Zero-Velocity Curves. Diese Bezeichnung ergibt sich daraus, dass der Testkörper diese Kurven nur dann erreichen kann, wenn seine Geschwindigkeit in dem rotierenden System verschwindet. Um die Topologie dieser erlaubten Bereiche zu verstehen, sollten wir uns zuerst klar machen, dass $-E$ sehr groß wird, wenn entweder $(x^2 + y^2)$, d.h. das Quadrat des Abstandes der Testmasse vom Ursprung, sehr groß wird, oder wenn entweder r_1 oder r_2 sehr klein werden. Wenn daher $-C$ groß ist, muss sich die Testmasse entweder außerhalb eines großen Kreises mit Radius $x^2 + y^2 = -2C$ aufhalten oder aber innerhalb eines sehr kleinen Kreises um einen der beiden schweren Körper. Die Radien dieser Kreise sind jeweils gegeben durch $r_1 = (m-1)/C$ und $r_2 = -m/C$. Im ersten Fall empfindet der Testkörper die beiden Massen ungefähr als ein Gravitationszentrum, im anderen Fall sieht der Testkörper nur die eine Masse, die er umkreist.

§ 229 An dieser Stelle ist es sinnvoll, die Punkte zu bestimmen, an denen die Gesamtkraft auf den Testkörper Null ist, d.h. die Punkte, an denen er im rotierenden Bezugssystem in Ruhe bleibt. Dazu muss gelten

$$-\nabla W = \vec{r} - (1-m) \frac{\vec{r}_1}{r_1^3} - m \frac{\vec{r}_2}{r_2^3} = 0,$$

mit $\vec{r} = (x, y)$, $\vec{r}_1 = (x+m, y)$ und $\vec{r}_2 = (x-1+m, y)$. Da das Massenzentrum im Ursprung liegt, ist dann $\vec{r} = (1-m)\vec{r}_1 + m\vec{r}_2$. Einsetzen liefert

$$(1-m) \left[\frac{1}{r_1^3} - 1 \right] \vec{r}_1 + m \left[\frac{1}{r_2^3} - 1 \right] \vec{r}_2 = 0. \quad (2.32)$$

Wenn sich diese Gleichgewichtspunkte nicht auf der x -Achse befinden, so kann die Gleichung nur dann erfüllt werden, wenn $r_1 = r_2 = 1$, d.h. zwei der Gleichgewichtspunkte sind jeweils die Spitzen eines gleichseitigen Dreiecks, dessen Basis durch die Strecke zwischen den beiden schweren Massen gegeben ist (L_4 und L_5 in Abb. 2.29).

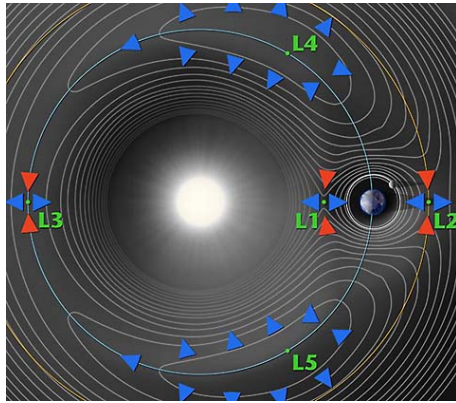


Abbildung 2.29: Lage der fünf Lagrange-Punkte im rotierenden Bezugssystem [438] zusammen mit den Äquipotentiallinien

§ **230** Um die Lösungen von (2.32) zu bestimmen, die auf der x -Achse liegen, ist es hilfreich, eine dimensionslose Größe $\alpha = x + m$ einzuführen. Damit lässt sich die Gleichung umwandeln zu

$$(1 - m) \frac{\alpha}{|\alpha|^3} + m \frac{(\alpha - 1)}{|\alpha - 1|^3} = \alpha - m. \quad (2.33)$$

Die Fälle $\alpha=0$ und $\alpha=1$ entsprechen dabei den Situationen, dass sich die Testmasse am Ort von M bzw. m befindet. Die Gleichung hat stets drei reelle Lösungen, wir werden sie hier für den eingeschränkten Fall lösen, dass $m \ll M$ ist, d.h. $m \ll 1$. Diese Situation ist für die meisten Anwendungen im Sonnensystem, also z.B. für das Erde-Mond-System oder das Sonne-Jupiter-System gegeben.

§ **231** Eine offensichtliche Lösung ist der L_3 -Punkt, an dem sich der Testkörper genau entgegengesetzt zur kleineren Masse m befindet. Diese Lösung können wir finden, wenn wir in (2.33) $\alpha = -1 + O(m)$ setzen, so dass sich $\alpha = -1 + \frac{7}{12}m + O(m^3)$ ergibt. Betrachtet man nur einen anziehenden Körper, so befindet sich der Testkörper an diesem Punkt in einem Gleichgewicht aus der Anziehung des Hauptkörpers und der Zentrifugalkraft. Die Anwesenheit der zweiten anziehenden Masse bewirkt eine zusätzliche Anziehungskraft, die zu einer Verstärkung der Anziehung führt, wobei sich der Gleichgewichtspunkt geringfügig nach links verschiebt. Diese neue Kraft wird durch einen Zuwachs der Zentrifugalkraft ausgeglichen.

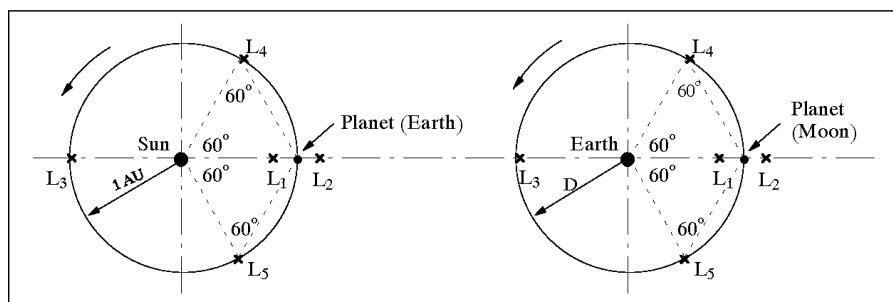
§ **232** Zwei weitere Gleichgewichtspunkte befinden sich an Punkten dicht an der kleinen Masse, deren Störungen den Radius des Keplerorbits um die Masse M beeinflussen. In diesem Falle müssen wir die Ordnung in m der kleinen Größe $\alpha \ll 1$ finden. Dazu setzen wir versuchsweise $\alpha = 1 + \lambda m q$. Darin ist $q > 0$ und λ in der Größenordnung von 1. Damit ergibt sich für (2.33)

$$\frac{m^{(1-2q)\lambda}}{|\lambda|^3} = 3\lambda m q + O(m^2 q),$$

wobei die beiden größeren Terme für $q = 1/3$ von der gleichen Ordnung sind. Dann erhalten wir $|\lambda|^3 = \frac{1}{3}$ und damit für die beiden Gleichgewichtspunkte $\alpha = 1 \pm (m/3)^{1/3} + O(m^{2/3})$. Dabei nimmt der Abstand von der kleineren Masse nur mit der dritten Wurzel ab.

§ **233** Damit ergibt sich für die fünf Lagrange-Punkte:

$$\begin{aligned} L_1 &= [1 - m + (m/3)^{1/3}, 0], \\ L_2 &= [1 - m - (m/3)^{1/3}, 0], \\ L_3 &= [-1 - 5m/12, 0], \\ L_4 &= [1/2 - m, -\sqrt{3}/2], \\ L_5 &= [1/2 - m, \sqrt{3}/2]. \end{aligned}$$



Lagrangian Points	Sun - Earth System		Earth - Moon System	
	Distance from Sun	Distance from Earth	Distance from Earth	Distance from Moon
L ₁	0.99 AU = 1.48×10^8 km	0.00997 AU = 1.49×10^6 km	0.85 D = 326740 km	0.15 D = 57660 km
L ₂	1.01 AU = 1.51×10^8 km	0.010 AU = 1.50×10^6 km	1.17 D = 449748 km	0.17 D = 65348 km
L ₃	0.999 AU = 1.496×10^8 km	1.999 AU = 2.992×10^8 km	0.99 D = 380556 km	1.99 D = 764956 km
L ₄	1.00 AU	1.00 AU	1.00 D	1.00 D
L ₅	1.00 AU	1.00 AU	1.00 D	1.00 D
	$d_{\text{Sun}} = 1\,392\,000$ km	$d_{\text{Earth}} = 12\,740$ km (average diameter)		$d_{\text{Moon}} = 3476$ km
	Sun-Earth distance (center-center) = 1 AU (Astronomical Unit) = 1.496×10^8 km		Earth-Moon distance D = 384 400 km (center-center)	

Abbildung 2.30: Lagrange Punkte im Sonne–Erde und Erde–Mond System [134]

Diese fünf Punkte sind in Abb. 2.29 im rotierenden Bezugssystem dargestellt; eine entsprechende Abbildung mit den Zahlenwerten für das System Sonne–Erde sowie das System Erde–Mond findet sich in Abb. 2.30.

§ 234 Um die Form der Zero-Velocity-Kurven mit $W(x, y) = \text{const}$ zu bestimmen, ist es nützlich, die Werte von W an den fünf stationären Punkten L_i zu bestimmen zusammen mit dem topologischen Charakter dieser Punkte. Das kann durch die Bestimmung der zweiten Ableitung von W und die Bestimmung des Vorzeichens der Jacobi-Determinante $J = (\partial_{xx}W)(\partial_{yy}W) - (\partial_{xy}W)^2$ an den Lagrange-Punkten geschehen. Dabei ergibt sich $W(L_5) = W(L_4) > W(L_3) > W(L_1) > W(L_2)$. Dabei sind L_4 und L_5 Maxima, die anderen Lagrange-Punkte dagegen sind Sattelpunkte, siehe auch Abb. 2.29. Damit lassen sich die Zero-Velocity-Kurven eindeutig definieren, wenn wir die Jacobi-Konstante von sehr großen negativen Werten (z.B. die schon weiter oben diskutierten Grenzen) durch die kritischen Werte ansteigen lassen. Qualitativ ergeben sich dabei fünf Möglichkeiten:

- I $C < W(L_2)$: Die Bewegung ist nur innerhalb zweier kleiner Kreise um die beiden massiven Körper erlaubt, oder außerhalb eines großen Kreises, der beide massiven Körper umfasst. In diesem Falle kann die Testmasse als ein Satellit der beiden massiven Körper (die von der Testmasse nur als ein Gravitationszentrum gesehen werden) betrachtet werden.
- II $W(L_1) > C > W(L_2)$: Zwischen den beiden erlaubten Regionen um die beiden massiven Körper öffnet sich ein Kanal. Der Testkörper kann sich, wenn er sich einmal in der Nähe der beiden massiven Körper befindet, nicht aus deren Nähe entfernen. In diesem Bild können Satelliten zwischen den beiden Körpern ausgetauscht werden, der Testkörper kann aber das System nicht verlassen. Eine entsprechende Beschreibung wäre z.B. auch für die Materie in einem Doppelsternsystem angemessen. Diese Topologie erklärt auch, warum die meisten Trajektorien zwischen Erde und Mond die Form einer 8 annehmen, wobei der Schnittpunkt in der Nähe von L_2 liegt.
- III $W(L_3) > C > W(L_1)$: Der erlaubte Bereich öffnet sich hinter der kleineren Masse und der Testkörper kann durch dieses Loch entweder von der schwereren Masse entweichen oder, wenn er sich ursprünglich im äußeren Bereich befunden hat, in die Nähe der schwereren Masse vordringen. Der verbotene Bereich hat ungefähr die Form eines Hufeisens, die L_4 und L_5 liegen in der Nähe der Spitzen, L_3 liegt innerhalb des Hufeisens.

- IV $W(L_5) = W(L_4) > C > W(L_3)$: Auch hinter der schwereren Masse öffnet sich ein Kanal, dadurch sind die Zero-Velocity-Kurven wieder voneinander getrennt. Die Bewegung ist dann nur noch in zwei relativ schmalen Bereichen um L_4 und L_5 verboten.
- V $C > W(L_4) = W(L_5)$: Die Bewegung kann in der gesamten (x, y) -Ebene erfolgen.

Verständnisfrage 19 Erklären Sie die relativen Werte von $W(L_i)$ anschaulich.

Verständnisfrage 20 Ist die Acht unter Pkt. II eine Alternative zum Transferorbit nach Hohmann?

§ **235** Diese Klassifikation bzw. Topologie bleibt selbst dann erhalten, wenn einige der bei der Herleitung gemachten Einschränkungen nicht mehr gelten. Ist die kleinere Masse m nicht infinitesimal, so verschieben sich die drei Lagrange-Punkte lediglich entlang der x-Achse des Systems. Selbst wenn die Orbits der beiden Massen eine gewisse, allerdings nicht zu große Exzentrizität aufweisen, ist eine Klassifikation mit Hilfe der Jacobi-Konstanten immer noch sinnvoll, insbesondere im Hinblick auf Stabilität oder Entweichen der Testmasse.

§ **236** Eine der entscheidendsten und auch interessantesten Fragen betrifft die Stabilität der Lagrange-Punkte: wenn die Testmasse anfangs in einen geringen Abstand von einem der Lagrange-Punkte gesetzt wurde, bleibt sie dann in der Nähe dieses Punktes oder entfernt sie sich immer weiter vom Lagrange-Punkt? Betrachten wir nur die zweiten Ableitungen des Potentials, so wäre keiner der Lagrange-Punkte stabil, da keiner von ihnen einem Minimum im Potential entspricht. Allerdings wirkt in unserem System auch noch die geschwindigkeitsabhängige Corioliskraft. Damit ergibt sich, dass die beiden Lagrange-Punkte L_4 und L_5 stabil sind [17]. Die Stabilität dieser beiden Lagrange-Punkte ist auch praktisch bewiesen durch die Trojaner, zwei Familien von Asteroiden, die im System Sonne–Jupiter stabil um diese Punkte oszillieren. Die Punkte befinden sich dabei auf dem Jupiter–Orbit und laufen jeweils um 60° versetzt vor bzw. hinter dem Planeten her. Auch scheinen viele der Saturnmonde kleine, Trojaner-ähnliche Begleiter zu haben.

§ **237** Die Punkte L_1 bis L_3 sind – wie schon im Zusammenhang mit der viel zu einfachen Abschätzung in § 223 diskutiert – instabil; jedoch gibt es Bahnen um diese Punkte herum, die stabil sind. Im Falle der in § 222 genannten Satelliten handelt es sich um elliptische Bahnen um den L_3 -Lagrange-Punkt, häufig auch als Halo-Orbit (siehe auch Abb. 2.28) bezeichnet.

§ **238** Die Stabilisierung durch die Ellipsenbahn folgt dem Prinzip des Kreisels. Die Ellipsenbahn ist mit einem Drehimpuls verbunden, wobei, da die Bahnebene senkrecht auf der Achse Sonne–Erde steht, der Drehimpulsvektor entlang eben dieser Achse ausgerichtet ist. Wird jetzt der Satellit etwas aus der Bahn ausgelenkt, so ist das Gleichgewicht der Anziehungskräfte von Sonne und Erde verletzt und es wirkt eine Nettokraft in Richtung auf einen der Körper. Das bedeutet aber nichts anderes, als würde man versuchen, einen Kreisler zu kippen: auf einen Drehimpuls wirkt ein Drehmoment (im Falle des normalen Kreislers die Schwerkraft, im Falle des Satelliten die Netto-Anziehungskraft durch den jetzt dominierenden Körper). Der Kreisler antwortet darauf, indem er versucht, seinen Drehimpulsvektor in Richtung des Drehmomentvektors zu ändern. Dadurch weicht er dem Umkippen aus und führt eine Präzessionsbewegung aus. Für Satelliten im Lagrange-Punkt zwischen Sonne und Erde ermöglichen diese Stabilisierungsorts auch eine ungestörte Kommunikation mit dem Satelliten, da sich dieser dann, von der Erde aus gesehen, um die Radioquelle Sonne bewegt aber nie direkt vor ihr steht.

2.7.2 Planetares Billard

§ **239** Die bisher betrachteten Bewegungen waren alle periodische Bewegungen mit der Erde oder Sonne als Zentralkörper bzw. um den Lagrange-Punkt – wobei letztere gleichzeitig

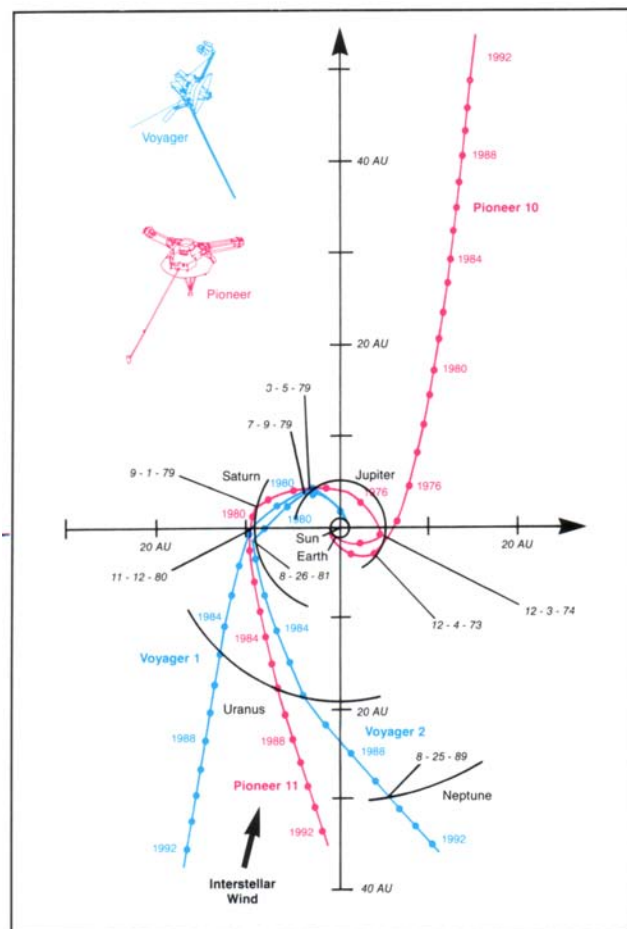


Abbildung 2.31: Bahnen der Voyager- und Pioneer-Sonden [13]

auch eine periodische Bewegung zumindest des Mittelpunktes des Halo-Orbits um den Zentralkörper ist.²⁶ Bei Missionen zu einem anderen Planeten werden vielfach die bereits in Abschn. 2.6.3 betrachteten Hohmann-Bahnen verwendet, bei Missionen zu mehreren Planeten ergeben sich komplexere Bahnen.

§ 240 Abbildung 2.31 zeigt als Beispiele die Bahnen der Pioneer [499] und Voyager [476] Sonden. Auffallend sind die starken Änderungen der Bahn in der Nähe anderer Himmelskörper. Diese Bahnänderungsmanöver werden als gravity assisted navigation, Gravitationsumlenkung oder Swing By bezeichnet.

Querverbindung 1 Wie bereits in § 211 angedeutet, sind diese Bahnen schneller als Hohmann-Bahnen, da sie nicht tangential am Planetenorbit sind.

§ 241 Das Prinzip des Swing By beruht darauf, dass bei genügend nahem Vorbeiflug an einem Himmelskörper (Planeten oder Monde) das Gravitationspotential und die Eigenbewegung dieses Himmelskörpers ausgenutzt werden, um eine Impulsänderung zu erzielen [30, 69, 156, 453, 755, 756]. Diese Impulsänderungen werden ausgenutzt, um mehrere Planeten mit einer Sonde besuchen zu können bzw. mehrere Monde auf einer Mission anzufliegen. Die erforderliche Genauigkeit dieses Billardspiels lässt sich am Beispiel der Mariner-Mission [50] illustrieren: Der Fehler beim Venus-Vorbeiflug durfte maximal 300 km betragen bei einer Flugstrecke von 250 Millionen km. Der echte Fehler betrug nur 20 km. Ein Scharfschütze

²⁶Die Aussage ist physikalisch nicht korrekt – es wird um den Massenmittelpunkt der beiden schwereren Massen rotiert. Glücklicherweise liegt dieser im zentralkörper Sonne – die Näherung haben wir bereits beim eingeschränkten Zweikörperproblem verwendet.

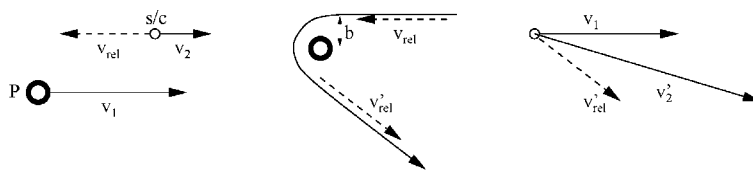


Abbildung 2.32: Swing By an einem Planeten

müsste bei entsprechender Präzision ein 10-Pfennigstück über eine Entfernung von 250 km treffen [69].

§ 242 Aber nicht nur die Präzision ist wichtig für eine derartige Schleudertour, im Falle von sehr ausgedehnten Missionen wie der Voyager-Mission ist auch die relative Stellung der Planeten zueinander von Bedeutung: für den Voyager-Flug lagen alle diese Planeten auf einer Kurve, deren Krümmungsrichtung sich nicht änderte. Es entstand also kein Zick-Zack-Kurs, der einen extrem hohen Energiebedarf bedeutet hätte. Diese Voraussetzung ist jedoch aufgrund der langen Umlaufzeiten der äußeren Planeten nur alle 177 Jahre erfüllt, vor dem Voyager-Start im Jahre 1977 war das zur Zeit der napoleonischen Kriege zuletzt der Fall.²⁷

§ 243 Um das Prinzip des Schwungholens an einem Planeten zu verstehen, ist es wichtig, die Eigenbewegung des Planeten zu berücksichtigen. Würde die Raumsonde in die Nähe eines ruhenden Körpers gelangen, so würde sie, vorausgesetzt ihre Anfangsgeschwindigkeit ist ausreichend groß, beim Anflug durch die in Bewegungsrichtung wirkende Gravitation beschleunigt werden, dann aber beim Weiterflug hinter dem Planeten wieder abgebremst werden. Dabei würde sich eine Hyperbelbahn ergeben, wobei die Geschwindigkeit auf beiden Ästen die gleiche ist, d.h. es findet zwar eine Impulsänderung statt aber keine Energieänderung. In der Realität bewegt sich der Planet jedoch und die Sonde kann einen verschwindend kleinen Teil der kinetischen Energie des Planeten abzweigen und zur Erhöhung der eigenen Geschwindigkeit verwenden.

§ 244 Anschaulich beschreibt Giese [69] diese Technik folgendermaßen: Im Prinzip ähnelt der Vorgang einem irdischen Experiment, bei dem ein Tennisball senkrecht an einem Haus mit einer Anfangsgeschwindigkeit v_1 hochgeworfen wird und mit verringerter Geschwindigkeit v_2 an einem Balkon vorbeikommt, wo ihn ein Tennisspieler mit seinem Schläger (Geschwindigkeit v_j) weiter nach oben schlägt. Auf diese Weise erreicht der Ball wieder eine höhere Geschwindigkeit $v'_2 > v_2$ und steigt weiter auf als ihn die Person vom Boden aus eigener Kraft hätte schleudern können.

§ 245 Übertragen auf ein Raumfahrzeug F , das durch Wechselwirkung mit einem Planeten P von einer heliozentrischen Geschwindigkeit v_2 auf eine höhere Geschwindigkeit v'_2 beschleunigt werden soll, ergibt sich das Prinzip der Swing By-Technik wie in Abb. 2.32 dargestellt. Dieser Vorgang lässt sich in drei Abschnitte unterteilen:

1. Zunächst holt der Planet in dem vereinfacht dargestellten Fall mit seiner Eigengeschwindigkeit v_1 die sich mit einer Geschwindigkeit v_2 bewegende Raumsonde ein. Ein Beobachter auf dem Planeten würde daher die Sonde mit einer Geschwindigkeit $v_{\text{rel}} = v_2 - v_1$ auf sich zukommen sehen.
2. Der auf dem Planeten befindliche Beobachter würde dann feststellen, dass sich das Raumfahrzeug auf einer Hyperbelbahn um den Planeten herumschwingt, wobei der minimale Abstand im Perizentrum mit r_{Pz} bezeichnet ist. Schließlich verlässt das Raumfahrzeug den Wirkungsbereich des Planeten wieder mit einer Geschwindigkeit v'_{rel} . Dabei hat sich aber nicht der Betrag der Geschwindigkeit geändert, sondern lediglich die Richtung (d.h. im System des Planeten ist die Energie der Raumsonde nach der Wechselwirkung unverändert).

²⁷Die Konstellation ist natürlich nicht nur für ein Swing By wichtig sondern ebenso beim Flug zu einem anderen Planeten. Daher haben Missionen zu anderen Planeten in der Regel nur ein enges Startfenster – wird dieses nicht ausgenutzt, so heißt es warten.

3. Die heliozentrische Geschwindigkeit der Raumsonde nach der Wechselwirkung ist dagegen gegeben durch $\vec{v}'_2 = \vec{v}_1 + \vec{v}'_{\text{rel}}$. Die Raumsonde hat also nach der Wechselwirkung mit dem Planeten eine höhere Geschwindigkeit.

§ 246 Formal kann man den Vorgang als einen elastischen Stoß zwischen dem Raumfahrzeug und dem Planeten beschreiben oder als einen Streuprozess zwischen Sonde und Planet, wobei das Gravitationsfeld des Planeten die Ursache der Streuung ist. Dieser Streuvorgang ist durch die Einschussgeschwindigkeit v_∞ und den Stoßparameter b gekennzeichnet. Dadurch wird der Ablenkwinkel θ gegenüber der ursprünglichen Richtung \vec{v}_∞ festgelegt. Der Energiesatz für die Hyperbel war gegeben durch die Binet'sche Gleichung (2.17) zu

$$v^2 = \mu \left(\frac{2}{r} + \frac{1}{a} \right).$$

Die beiden Extremgeschwindigkeiten im Unendlichen bzw. im Perizentrum sind damit gegeben durch

$$v_{\text{rel}}^2 = v_{\text{rel}}'^2 = \frac{\mu}{a} \quad \text{bzw.} \quad v_{\text{Pz}}^2 = \mu \left(\frac{2}{r_{\text{Pz}}} + \frac{1}{a} \right).$$

§ 247 Aus der Drehimpulserhaltung ergibt sich mit v_{Pz} als der Geschwindigkeit im Perizentrum $\sigma = \sqrt{\mu a(\epsilon^2 - 1)} = r_{\text{Pz}} v_{\text{Pz}}$. Aus der Hyperbelgeometrie lässt sich über

$$\cos \frac{(180^\circ - \theta)}{2} = \frac{a}{\sqrt{a^2 + a^2(\epsilon^2 - 1)}}$$

der Ablenkwinkel bestimmen zu

$$\sin \frac{\theta}{2} = \frac{1}{\epsilon}.$$

Durch Einsetzen in den Drehimpulssatz wird

$$r_{\text{Pz}}^2 v_{\text{Pz}}^2 = \mu a(\epsilon^2 - 1) = r_{\text{Pz}}^2 \mu \left(\frac{2}{r_{\text{Pz}}} + \frac{v_{\text{rel}}^2}{\mu} \right)$$

und es ist

$$\frac{b}{a\epsilon} = \sin \left(90^\circ - \frac{\theta}{2} \right) = \sqrt{1 - 1/\epsilon^2}.$$

Damit lassen sich der Ablenkwinkel und der Stoßparameter bestimmen zu

$$\sin \frac{\theta}{2} = \frac{1}{1 + \frac{r_{\text{Pz}} v_{\text{rel}}^2}{\mu}} \quad \text{und} \quad b = r_{\text{Pz}} \sqrt{1 + \frac{2\mu}{r_{\text{Pz}} v_{\text{rel}}^2}}.$$

Bei sehr weitem (großes r_{Pz}) und/oder sehr schnellem Vorbeiflug erfolgt also kaum eine Ablenkung. Andererseits wird die Ablenkung um so größer, je dichter die Raumsonde an den Planeten kommt, d.h. je kleiner r_{Pz} wird. Damit lässt sich eine maximale Ablenkung bestimmen, da die geringste Annäherung durch den Planetenradius bestimmt ist (es kann also in keinem Falle eine Ablenkung um 180° erfolgen). Je massereicher der Planet ist, umso näher kann man diesem Wert kommen. Der Stoßparameter b gibt an, wohin die Raumsonde gelenkt werden muss, um bei vorgegebenem r_{Pz} und v_{rel} die gewünschte Ablenkung θ zu erreichen.

Verständnisfrage 21 Warum ergibt sich bei einem schnelleren Vorbeiflug eine geringere Ablenkung? Bei der Bethe–Bloch-Formel (5.2) ist es genauso. Mit der gleichen Begründung?

§ 248 Außer bei den Voyager- [476] und Pioneer-Sonden [499] wurde diese Technik des Swing By unter anderem auch bei Mariner 10 [50] zum Besuch von Venus und Merkur angewendet; bei Ulysses [474], um wie in Abb. 2.33 angedeutet aus der Ebene der Ekliptik zu gelangen (Ausnutzung des Gravitationspotentials vom Jupiter – Jupiter ist für solche Manöver sehr

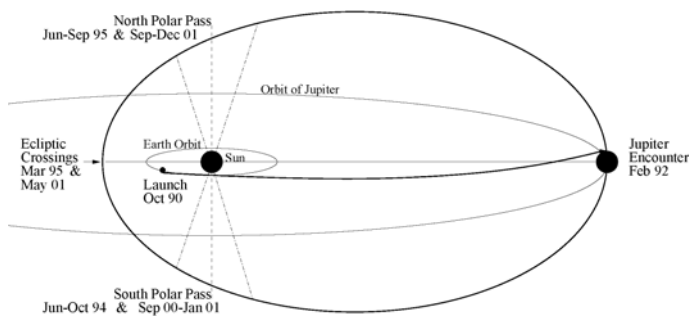


Abbildung 2.33: Mit Hilfe eines Swing By Manövers am Jupiter war es der Raumsonde Ulysses möglich, die Ebene der Ekliptik zu verlassen und die Pole der Sonne zu überfliegen

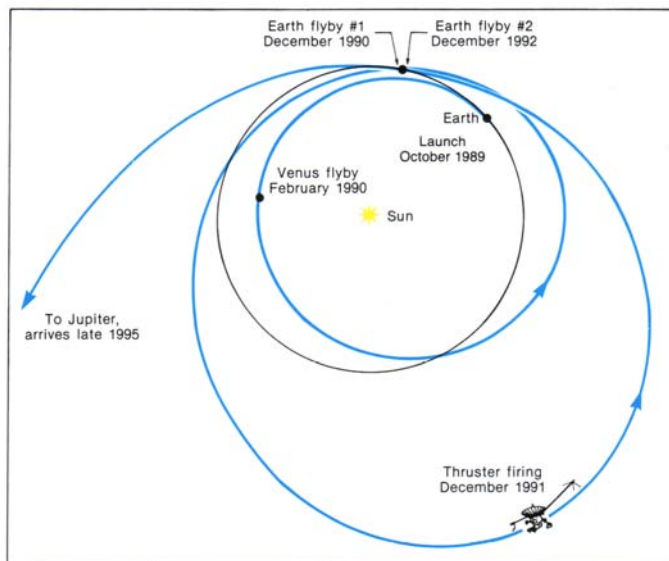


Abbildung 2.34: VEEGA (Venus-Earth-Earth gravity assist) Manöver der Raumsonde Galileo: mehrfaches Schwungholen, um die für den Flug zum Jupiter benötigte Geschwindigkeit zu erreichen [13]

gut geeignet, da er nach der Sonne das Objekt mit der größten Masse im Sonnensystem ist) und bei Galileo [457] zum Einschwenken in eine Jupiter-Umlaufbahn unter Ausnutzung der Gravitation der Planetenmonde. Zusätzlich wird das Schwungholen an Planeten und Monden bei Galileo nicht nur zur Bahnänderung, sondern auch zur Geschwindigkeitserhöhung eingesetzt. Ursprünglich sollte Galileo zusammen mit einer Flüssigtreibstoff-Rakete vom Space Shuttle in einer niedrigen (ca. 400 km) Erdumlaufbahn ausgesetzt werden und dann mit Hilfe dieser Rakete in Richtung auf den Jupiter geschossen werden. Nach der Explosion der Challenger im Januar 1986 wurde jedoch der Transport von Flüssigtreibstoffen im Space Shuttle verboten, Galileo konnte daher nur mit einer weniger explosiven aber auch weniger schubstarken Feststoffrakete ausgesetzt werden. Um dennoch die notwendige Geschwindigkeit zu erreichen, wurde Galileo auf einen Kurs gebracht, der es ihm ermöglichte, einmal an der Venus und zweimal an der Erde Schwung zu holen (VEEGA: Venus-Earth-Earth gravity assist, vgl. Abb. 2.34), um dann seine drei Jahre dauernde Reise zum Jupiter zu beginnen. Der jüngste Swinger ist die Sonde Cassini-Huygens [352, 454, 453] auf ihrem Weg zum Saturn.

Literatur

§ 249 Allgemeine Einführungen in Satellitenbahnen und ihre Störungen geben die Bändchen von Sagirow [210] und Bohrmann [26]. Dort werden auch Hohmann- und andere Transferbahnen behandelt. Spezielle Bahnen, insbesondere die Stabilität von Satelliten in Lagrange-Punkten und interplanetares Billard, werden diskutiert in Bertotti und Farinella [17]. Für die formalen Betrachtungen (Zweikörper- und eingeschränktes Dreikörperproblem) kann auch ein Lehrbuch zur Theoretischen Physik zu Rate gezogen werden.

Fragen

Frage 1 Die Bahnen von nicht manövrierfähigen Satelliten werden durch die Kepler'schen Gesetze beschrieben. Geben Sie diese an (verbal, wo möglich auch formal).

Frage 2 Die Kepler'schen Gesetze sind empirisch bestimmt. Welche Grundkonzepte und -gleichungen werden zu ihrer formalen Herleitung benötigt?

Frage 3 Eine elliptische Bahn wird, ebenso wie eine Kreisbahn, durch ein Kräftegleichgewicht bestimmt. Für die Kreisbahn muss die Gravitationskraft gleich der Zentripetalkraft sein. Welche Kräfte wirken auf den Satelliten auf einer elliptischen Bahn (bitte mit Skizze)?

Frage 4 Bei der Herleitung der Kepler'schen Gesetze macht man den Übergang vom allgemeinen zum eingeschränkten Zweikörperproblem. Welche Annahmen gehen dabei ein? Erläutern Sie, unter welchen Bedingungen diese Vereinfachung sinnvoll ist.

Frage 5 Die Herleitung der Kepler'schen Gesetze beruht auf fundamentalen Erhaltungssätzen. Geben Sie die Erhaltungssätze an und ihren Zusammenhang mit der Bewegungsgleichung.

Frage 6 Satellitenbahnen sind Kegelschnitte. Kreuzen Sie die wahren Aussagen an:

- Ist die Anfangsgeschwindigkeit eines Satelliten kleiner der ersten kosmischen Geschwindigkeit, so ergibt sich eine Wurfparabel.
- Wird die Geschwindigkeit eines Satelliten durch Reibung auf einen Wert kleiner der Kreisbahngeschwindigkeit verringert, so stürzt der Satellit auf einer Spiralbahn ab.
- Ein Satellit mit einer Geschwindigkeit größer der Kreisbahngeschwindigkeit entweicht aus dem Schwerefeld der Erde.
- Eine hinreichende Bedingung für eine Ellipsenbahn ist eine Bahngeschwindigkeit kleiner der zweiten kosmischen Geschwindigkeit.
- Die Geschwindigkeit eines Satelliten im Perigäum darf nicht kleiner sein als die Kreisbahngeschwindigkeit.
- Die Geschwindigkeit eines Satelliten im Apogäum darf nicht kleiner sein als die Kreisbahngeschwindigkeit.

Frage 7 Bestimmen Sie aus der Binet'schen Gleichung den Zusammenhang zwischen Kreisbahngeschwindigkeit und erster kosmischer Geschwindigkeit sowie zwischen Kreisbahngeschwindigkeit und zweiter kosmischer Geschwindigkeit.

Frage 8 Durch welche Parameter ist die Lage einer Satellitenbahn im Raum bestimmt? Welche zusätzlichen Parameter sind zur Angabe der Satellitenposition erforderlich? Benennen und erklären Sie die Parameter.

Frage 9 Erläutern Sie den Begriff Inklination.

Frage 10 Bestimmen Sie die Bahngeschwindigkeiten eines Satelliten im Perigäum und im Apogäum.

Frage 11 Auch ohne Kenntnis der Gravitationskonstante kann man angeben, wieviel mal massereicher die Sonne ist als die Erde. Man braucht dazu außer allbekanntem Daten über die Jahres- und Monatslänge nur das Verhältnis des Abstände von Sonne bzw. Mond von der Erde (400:1), nicht aber die absoluten Abstände. Wie funktioniert das?

Frage 12 Für ein studentisches Kleinsatellitenprojekt hat die Uni Osnabrück auf dem Westerberg eine Raketenstartrampe errichtet. Der Satellit soll auf einer antriebslosen Bahn fliegen; zur Auswahl stehen ein Instrument zur Untersuchung des Wasserdampftransports über tropischen Ozeanen oder ein Instrument zur Untersuchung des Anteils flüssigen Wassers in Eis. Welches Instrument ist für den Satelliten besser geeignet?

Frage 13 Bahnmanöver: welche der folgenden Aussagen ist wahr?

- Eine Erhöhung der Bahngeschwindigkeit führt auf ein höheres Orbit.
- Eine Änderung der Bahngeschwindigkeit senkrecht zur Bahnebene führt stets auf eine Drehung der Bahnebene unter Beibehaltung der Bahn in der Bahnebene.
- Ein dauerhaft höheres Orbit lässt sich nur mit mindestens zwei Geschwindigkeitsänderungen erreichen.
- Um in ein ansonsten identisches Orbit senkrecht zur Ausgangsbahnebene zu gelangen, muss die Kraft in einem Winkel von 135° zur Flugrichtung stehen.
- Um in ein ansonsten identisches Orbit senkrecht zur Ausgangsbahnebene zu gelangen, muss die Kraft in einem Winkel von 45° zur Flugrichtung stehen.

Frage 14 Eine Sojus-Kapsel nähert sich der Internationalen Raumstation ISS auf einem kreisförmigen Orbit wenige Kilometer unterhalb der Umlaufbahn der Raumstation (ebenfalls kreisförmig, beide Bahnen liegen bereits in einer Ebene). Skizzieren Sie, welche Manöver der Kommandant der Sojus-Kapsel ausführen muss, um an der Raumstation andocken zu können (Achtung, beim Andocken sollte die Relativgeschwindigkeit Null sein).

Frage 15 Zum Nachdenken: Um, insbesondere im Hinblick auf Langzeitmissionen, etwas mehr Bewegung zu haben, darf die Mannschaft eines Space Shuttle jetzt Tischtennis spielen. Aus Platzgründen geht das allerdings erst nach dem Aussetzen der Nutzlast in der offenen Ladebucht (Sport an frischer Luft ist ohnehin gesünder). Diskutieren Sie, ob sich aus dieser Situation veränderte Spielgewohnheiten ergeben, z.B. unter den folgenden Gesichtspunkten: kann man einen normalen Aufschlag machen (den Ball hochwerfen und dann schlagen)? Oder sollte man einen modifizierten Aufschlag entwickeln? Was passiert mit dem Ball, wenn der Partner nicht trifft? Gibt es Situationen, in denen Sie den Ball in einem späteren Orbit wieder einfangen können? Macht es einen Unterschied, ob das Shuttle (wie normal) mit der geöffneten Ladebucht nach unten zur Erde blickend fliegt oder mit einer nach außen weisenden Ladebucht? Wenn Ihnen die Situation zu unübersichtlich ist, betrachten Sie einfache Grenzfälle: was passiert mit Bällen, die (a) senkrecht nach oben, (b) senkrecht nach unten, (c) direkt in Flugrichtung, (d) entgegen der Flugrichtung und (e) senkrecht zur Bahnebene (also nach links oder rechts) geworfen werden.

Frage 16 Veranschaulichen Sie sich, warum die Gesamtenergie der Ellipsenbahn nur von der großen Halbachse abhängt, nicht jedoch von der Exzentrizität. Kann man diesen Zusammenhang gezielt nutzen, um zumindest für kurze Zeiten möglichst große Abstände von der Erdoberfläche zu erreichen?

Frage 17 Erdfernerkundungssatelliten werden häufig in sonnensynchrone Bahnen gebracht. Was versteht man unter einer sonnensynchronen Bahn, welche Vorteile hat sie?

Frage 18 Geben Sie typische Bahnparameter für Erdfernerkundungssatelliten an und begründen Sie, warum diese so gewählt werden.

Frage 19 Erläutern Sie Verfahren zur Lagestabilisierung eines Satelliten. Welche Verfahren sind für Erdfernerkundungssatelliten geeignet, welche nicht?

Frage 20 Bahnstörungen müssen nicht unbedingt Störungen sein sondern können auch gezielt zur Beeinflussung von Satellitenbahnen eingesetzt werden. Nennen Sie Beispiele.

Frage 21 Benennen Sie mindestens drei Störprozesse, die eine Satellitenbahn beeinflussen können und charakterisieren Sie diese kurz.

Frage 22 Reibung in der Hochatmosphäre kann auch zur Bestimmung der Dichte der Atmosphäre verwendet werden. Skizzieren Sie die Herleitung. Welche Größe wird als beobachtbare Größe verwendet?

Frage 23 Ein auf einer elliptischen Bahn befindlicher Satellit wird durch Reibung abgebremst. Wie verändert sich die Bahn? Erklären Sie, warum die Änderungen so erfolgen.

Frage 24 Geben Sie die Mindestflughöhe und Mindestumlaufdauer für einen Satelliten an. Was begrenzt diese Werte?

Frage 25 Die Mindestflughöhe eines Erdsatelliten ist durch Reibung in der Atmosphäre bestimmt. Gibt es auch eine maximale Flughöhe? Wenn ja, wodurch ist diese bestimmt und wie können Sie sie abschätzen?

Frage 26 Beschreiben Sie die Bahnstörungen, die sich aus der Erdabplattung ergeben. Wofür werden diese Störungen gezielt ausgenutzt?

Frage 27 Warum muss man bei einem Übergang von einem Orbit großer Höhe auf ein Orbit niedriger Höhe die gleiche Energie verwenden wie bei einem Übergang in Gegenrichtung? Bestimmen Sie die Gesamtenergie beider Bahnen. Wo bleibt die beim Übergang aufgebrauchte Energie beim Übergang von der höheren zur niedrigeren Bahn?

Frage 28 Warum kann eine Rakete bzw. ein Satellit die Atmosphäre beim Start problemlos durchdringen während abstürzende Satelliten verglühen?

Aufgaben

Aufgabe 1 Ein Molniya-Satellit hat ein Perigäum von 400 km und ein Apogäum von 40 000 km. Bestimmen Sie die jeweiligen Geschwindigkeiten.

Aufgabe 2 Ein Satellit der Masse $m = 1000$ kg befindet sich in einer polaren Umlaufbahn in 400 km Höhe. Durch einen einmaligen gleichförmigen Kraftstoß von 10 Sekunden Dauer wird der Satellit auf eine äquatoriale Bahn gebracht. Berechnen Sie die dazu erforderliche Kraft.

Aufgabe 3 Die Jupitermonde befolgen ebenfalls Kepler's drittes Gesetz: die Kuben der großen Halbachsen dividiert durch die Quadrate der Umlaufzeiten ergeben eine Konstante. Ist es die gleiche Konstante wie für Jupiter und die anderen Planeten beim Umlauf um die Sonne? Spezielle Frage im Bezug auf den Jupiter-Mond Io: sein Abstand vom Planeten beträgt $4.5 \cdot 10^5$ km, seine Umlaufzeit T 1 d 18 h 28 min. Wie groß ist die Masse des Jupiter?

Aufgabe 4 Berechnen Sie die Umlaufzeit eines Satelliten um den Mond, wenn dieser sich in einem Orbit mit einer Höhe von 100 km über der Mondoberfläche befindet. Wie groß wäre die Umlaufzeit einer entsprechenden Bahn um die Erde? (Mondparameter: Masse $7.3 \cdot 10^{23}$ kg, Radius 1738 km; Erdparameter: Masse $6 \cdot 10^{24}$ kg, Radius 6378 km)

Aufgabe 5 Der kleinste Abstand von Halleys Kometen zur Sonne beträgt $8.9 \cdot 10^{10}$ m, seine Umlaufzeit 76 Jahre. Welcher Art ist die Bahn? Berechnen sie (a) die Länge der großen Halbachse, (b) die Exzentrizität der Bahn, und (c) den Abstand des Aphels von der Sonne. Bestimmen Sie die Verhältnisse der Geschwindigkeiten (Bahn- und Winkelgeschwindigkeit) in Perihel und Aphel.

Aufgabe 6 Zwischen Erde und Sonne gibt es einen Punkt, an dem sich die Gravitationskräfte der beiden auf einen Satelliten aufheben. Wo liegt dieser neutrale Punkt? Wie groß sind die Bahn- und Winkelgeschwindigkeit eines Satelliten in diesem Punkt? Vergleichen Sie mit der Erde. (Abstand Sonne-Erde 1 AU = $149 \cdot 10^6$ km).

Aufgabe 7 Sie sind im Untersuchungsausschuss zum Coloumbia-Absturz [401] mit der Frage konfrontiert, ob eine Rettung der Astronauten auf die ISS möglich gewesen wäre. Die Coloumbia hätte zwar nicht andocken können, aber da auf ISS Raumanzüge vorhanden sind, hätte die Crew im Prinzip umsteigen können. Sie sollen sich mit der Frage auseinandersetzen, ob Coloumbia (Flughöhe 278 km, Inklination 39°) die ISS (385 km, Inklination 59.6°) überhaupt hätte erreichen können. Coloumbia hat keinen Treibstoff für großartige Bahnmanöver, der Treibstoffvorrat reicht nur für einen Abstieg auf ein 120 km hohes Orbit (von

dort an bremst die Erdatmosphäre ausreichend, um das Shuttle in einen geregelten Abstieg zu zwingen) sowie eine Sicherheitsreserve von 20%. Wäre mit diesem Treibstoff ein Aufstieg in das ISS-Orbit möglich gewesen?

Aufgabe 8 Der französische Erdfernerkundungssatellit SPOT fliegt in einem nahezu kreisförmigen Orbit in einer Höhe von 832 km. Bestimmen Sie die Bahngeschwindigkeit des Satelliten und seine Geschwindigkeit entlang der Bodenspur.

Aufgabe 9 Ein Satellit der Masse $m = 1000$ kg soll von einem Orbit in 400 km Höhe auf eine geostationäre Bahn in 36 000 km Höhe gebracht werden. Erläutern Sie das Verfahren und berechnen Sie die erforderlichen Geschwindigkeitsänderungen sowie die dazu erforderlichen Kräfte (Annahme: die Impulsänderung erfolgt gleichförmig über einen Zeitraum von jeweils 100 s).

Aufgabe 10 Eine Rakete bringt einen LandSat-Satelliten in ein kreisförmiges Orbit von 200 km Höhe. Der Satellit soll in ein Orbit mit einer Flughöhe von 850 km transferiert werden. Beschreiben Sie die Bahn. Welche Geschwindigkeitsänderungen müssen erfolgen? Wieviel Energie müssen Sie bei einem Satelliten der Masse 4 t dafür aufwenden? Wie lange dauert der Übergang? Mit welchen Geschwindigkeiten bewegt sich der Satellit in den beiden kreisförmigen Orbits?

Aufgabe 11 Eine Rakete bringt einen Satelliten ($m = 1000$ kg) in eine Umlaufbahn um die Sonne (Näherung: Satellit befindet sich im Erdorbit, ist jedoch gravitativ nicht mehr an die Erde sondern bereits an die Sonne gebunden). Der Satellit soll auf eine Merkurbahn/Jupiterbahn transferiert werden. Welche Energie ist aufzuwenden? (Masse Sonne $1.9 \cdot 10^{30}$ kg, Erdbahnradius 1 AU=149 Mio km, Merkurbahn 0.387 AU, Jupiterbahn 5.2 AU, Gravitationskonstante $6.67 \cdot 10^{-11}$ Nm²/kg²)

Kapitel 3

Satelliteninstrumente

Wer ein Phänomen vor Augen hat, denkt schon oft darüber hinaus; wer nur davon erzählen hört, denkt gar nichts.

J.W. Goethe

§ **250** Fernerkundungsinstrumente auf Satelliten sammeln Informationen über die Erdoberfläche, die Ozeane bis hin zu den Ozeanböden und die Atmosphäre. Einige sammeln auch noch weitergehende Informationen über Plasmen und Teilchen (das sind allerdings in-situ Messungen) oder über die Sonne (z.B. Solarkonstante und Strahlungsbilanz der Erde). Entsprechend der vielfältigen Fragestellungen und beobachteten Objekte hat sich eine große Vielfalt von unterschiedlichen Sensoren entwickelt, eine sehr umfassende Zusammenstellung gibt [134]. In diesem Kapitel werde ich mich auf die Vorstellung von Messprinzipien und Universalinstrumenten beschränken, Weiterentwicklungen werden nur skizziert. Zu den verschiedenen Typen von Instrumenten werden einige kurze Anwendungsbeispiele vorgestellt, weitere Anwendungsbeispiele, die teilweise auch auf der Kombination verschiedener Instrumententypen basieren, werden am Ende des Kapitels vorgestellt.

3.1 Grundlagen

§ **251** Satelliteninstrumente wurden und werden für eine Vielzahl unterschiedlicher Anwendungen und Fragestellungen entwickelt. Einige Satelliteninstrumente und Missionen sind eher experimentell, d.h. sie dienen im wesentlichen zur Entwicklung und zum Test von Instrumenten. Auch die über Jahrzehnte als Standard etablierten LandSats haben als instrumentelle Satelliten begonnen – sie leben weiter zum Monitoring (global change) und die mit ihnen erprobten Messprinzipien standen Pate für viele der modernen (kommerziellen) Instrumente.

§ **252** Andere Missionen verfolgen eine gezielte Fragestellung, z.B. eine genaue Kartographie des Meeresbodens. Diese Missionen sind in der Regel nur über einen gewissen Zeitraum aktiv. Eine weitere Klasse von Instrumenten und Missionen dient dem Monitoring, d.h. der kontinuierlichen Beobachtung. Wettersatelliten wie die in Tab. ?? genannten oder Instrumente zur Beobachtung von Ozon oder atmosphärischer Zusammensetzung sind typische Beispiele.

§ **253** Trotz der Vielfalt dieser Instrumente haben alle mit ähnlichen Randbedingungen zu kämpfen: (a) die Transmission der beobachteten elektromagnetischen Strahlung durch die Atmosphäre bzw. ihre Absorption und/oder Emission und (b) die eingeschränkten Ressourcen an Bord eines Satelliten. Wir werden beide Punkte kurz ansprechen und dann mit einer Klassifikation der Instrumente beginnen.

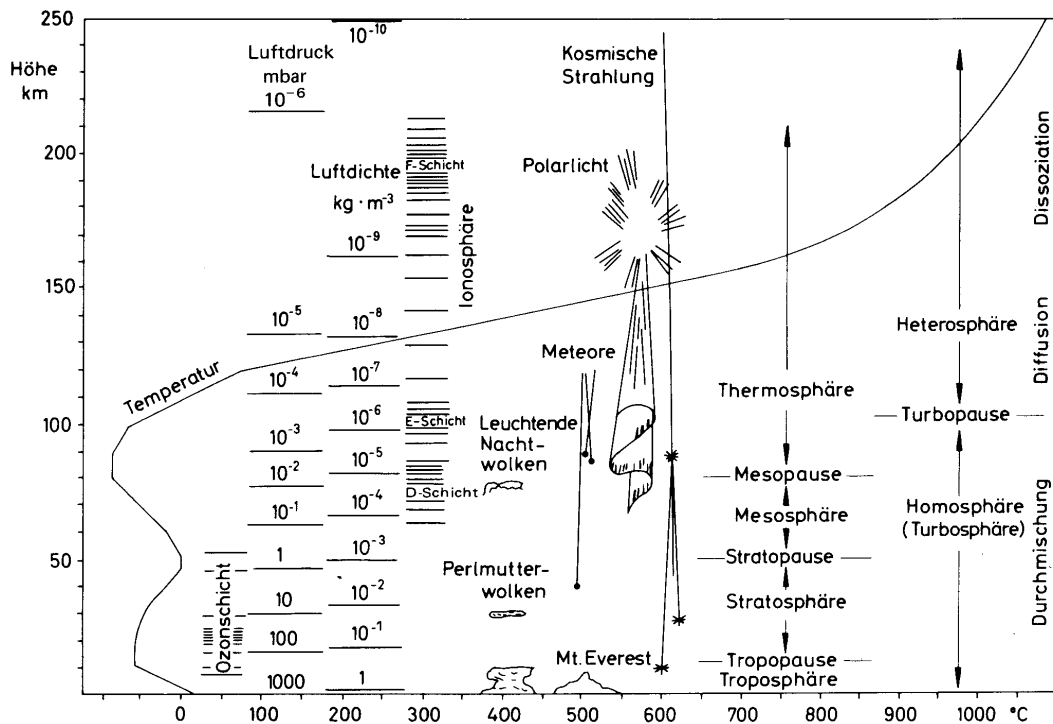


Abbildung 3.1: Die Stockwerkstruktur beschreibt den Aufbau der Atmosphäre [151]

3.1.1 Die Atmosphäre

§ 254 In der Fernerkundung ist die Atmosphäre des einen Freund (oder besser Forschungsobjekt), des anderen Feind (oder besser Störgröße im Hinblick auf sein Messziel). Beides sollte Grund genug sein, sich mit den wichtigsten Begriffen vertraut zu machen.

Stockwerkstruktur

§ 255 Abbildung 3.1 gibt einen Überblick über die vertikale Struktur der Atmosphäre. Diese wird an Hand des Temperaturprofils in verschiedene Schichten eingeteilt, daher auch manchmal die Bezeichnung Stockwerkstruktur.

§ 256 Die unterste Schicht, die Troposphäre ist die Wetterschicht des Planeten. Sie ist die einzige Schicht, in der sich in nennenswertem Maße Wasserdampf findet – und sie ist die Schicht, die vom Menschen am direktesten beeinflusst wird durch den Eintrag von Spurengasen und Schadstoffen ebenso wie durch thermische Emission. Die Troposphäre hat einen negativen Temperaturgradienten von ca. 6.5 K/km. Die Oberkante der Troposphäre befindet sich in einer Höhe zwischen 16 km (Äquator) und 8 km (Pole) und ist als Inversion im Temperaturverlauf kenntlich. Daher liegt diese Tropopause gleichsam wie ein Deckel auf der Troposphäre und behindert den Stoffaustausch mit den darüber liegenden Schichten.

§ 257 Die über der Tropopause liegende Stratosphäre ist durch einen positiven Temperaturgradienten gekennzeichnet. Diese Temperaturzunahme erfolgt im wesentlichen durch die Absorption solarer UV-Strahlung durch Ozon – die Ozonschicht ist ein wesentlicher Bestandteil der Stratosphäre. Auch wenn Ozon nur ein Spurengas ist, so lässt es sich gut vom Satelliten aus nachweisen, vgl. Abb. 1.4. Die Stratosphäre erstreckt sich bis in eine Höhe von ca. 50 km und wird begrenzt von der Stratopause. Da hier der Temperaturgradient wieder negativ wird bildet die Stratopause keine Inversion, ein Transport über die Stratopause ist also möglich. Der Abbau von Ozon durch die ausschließlich durch den Menschen in die Atmosphäre eingetragenen Fluorchlorkohlenwasserstoffe FCKWs zeigt, dass die Tropopause kein



Abbildung 3.2: Nachleuchtende Wolke (Noctilucent Cloud NLC) über Schottland [623] bzw. von der Space Station [239]

ganz fest schließender Deckel ist sondern einen Austausch von Substanzen zwischen Tropo- und Stratosphäre erlaubt.

§ 258 Die Mesosphäre, manchmal auch als Ignosphäre bezeichnet, erstreckt sich in eine Höhe bis ca. 90 km. Dies ist die Atmosphärenschicht über die am wenigsten bekannt ist, da sie für eine direkte Messung mit Flugzeugen oder Ballonen nicht zugänglich ist und eine indirekte Messung mangels besonderer Spurengase oder sonstiger Eigenarten ebenfalls nicht möglich ist. In der Mesosphäre herrscht wieder ein negativer Temperaturgradient, d.h. die Temperatur nimmt mit zunehmender Höhe ab.

§ 259 Ein ästhetischer, vielleicht auch umweltrelevanter Aspekt der Mesosphäre sind die nachleuchtenden Wolken; dünne Eisschleier wie in Abb. 3.2 bilden sich in der Nähe des Temperaturminimums der Mesopause, d.h. am Übergang zwischen Mesosphäre und Thermosphäre. Nachleuchtende Wolken finden sich in einer Höhe von ca. 83 km, sie sind ein polares Phänomen und verschwinden in mittleren Breiten in der Regel.¹ Eine sehr gute Übersicht über diese NLCs (Noctilucent Clouds) mit vielen Beispielen geben Gadsden und Schröder [66].

§ 260 Ab einer Höhe von ca. 90 km beginnt die Thermosphäre. Hier nimmt die Temperatur wieder zu bis auf Werte von bis zu 2000 K. Die Erwärmung entsteht durch die Absorption der harten elektromagnetischen Strahlung der Sonne sowie über den Polkappen auch durch einfallende energiereiche Teilchen (z.B. Polarlicht). Die Thermosphäre ist stark durch die solare Einstrahlung beeinflusst, ihre Eigenschaften zeigen daher einen deutlichen Tag-Nacht-Gang, eine Variation mit den Jahreszeiten und natürlich Veränderungen im Laufe des 11-Jahre dauernden Solarzyklus. Die Thermosphäre hat keine Oberkante, ab 500 km Höhe beginnt jedoch die Exosphäre: hier haben Wasserstoffatome eine hinreichend große thermische Energie und auf Grund der geringen Dichte auch sehr große mittlere freie Weglängen und können daher in den Weltraum entweichen. Dies ist als Geokorona in Satellitenaufnahmen zu erkennen.

§ 261 Die Erwärmung der Thermosphäre beruht auf der Absorption harter elektromagnetischer Strahlung. Der grundlegende physikalische Prozess ist die Ionisation (Photoeffekt und mit zunehmender Energie auch Compton-Effekt). Daher ist ein Teil der Thermosphäre ionisiert. Diese Schicht, in der neben Neutralgas auch Ladungsträger auftreten können, wird als Ionosphäre bezeichnet. Sie beginnt in einer Höhe von ca. 75 km, wobei dort der relative Anteil der Ladungsträger nur sehr gering ist. Der Ionisationsgrad steigt mit zunehmender

¹Keine Regel ohne Ausnahme: die nachleuchtende Wolke in Abb. 3.2 wurde über Schottland fotografiert, was nicht unbedingt als polar gilt. Und in Deutschland werden nachleuchtende Wolken sehr intensiv vom Institut für Atmosphärenphysik in Kühlungsborn untersucht [381]. Beobachtungen von NLCs von Norddeutschland aus werden auch beschrieben unter [269].

Höhe, ab ca. 250 km ist die Atmosphäre vollständig ionisiert. Die Ionosphäre beeinflusst die Ausbreitung von Radiowellen und ist daher für die Kommunikation zwischen Satellit und Bodenstation wichtig.

§ **262** Als Konsequenz ändert sich auch die Zusammensetzung der Atmosphäre. Bis in eine Höhe von 100 km ist die Ionisation gering und die Dichte groß genug, um für eine Durchmischung aller Gasbestandteile zu sorgen. In dieser Homosphäre besteht die Luft zu 78% aus N_2 , 21% O_2 und ca. 1% Ar sowie in der Troposphäre bis zu 4% Wasserdampf. Außerdem enthält die Atmosphäre Spurengase wie Ozon, Kohlendioxid und Methan. Oberhalb dieser Höhe beginnt die Heterosphäre – die geringere Dichte und damit reduzierte Kollisionsrate zwischen den Molekülen verhindert eine effiziente Durchmischung der verschiedenen Molekül- und Atomsorten, so dass diese Entmischen und sich mit eigener Skalenhöhe anordnen: die schweren Moleküle weiter unten, in größeren Höhen überwiegen leichte Moleküle und Atome (Sedimentation). Außerdem bewirkt die zunehmende Ionisierung eine Dissoziation der Moleküle, so dass mit zunehmender Höhe der Anteil der Atome gegenüber dem der Moleküle zunimmt.

§ **263** Die Atmosphäre lässt sich vom Satelliten aus mit verschiedenen, jeweils an bestimmte Fragestellungen angepassten Verfahren untersuchen:

- die Temperaturmessung in der Hochatmosphäre aus der Abbremsung von Satelliten ist uns bereits in Abschn. 2.3.2 begegnet. Als Messverfahren ist dies kein Remote Sensing sondern ein, wenn auch indirektes in-situ Verfahren.
- Spurengase in der Atmosphäre können durch rückgestreutes Licht nachgewiesen werden – das Ozonloch in Abb. 1.4 wurde auf diese Weise vermessen. Häufig wird auf diese Weise wie in dem Beispiel die horizontale Verteilung bestimmt – Information über die vertikale Verteilung der Spurengase können mit diesem Verfahren in der Regel nicht gewonnen werden.
- Im Labor würde man Spurengase durch Absorption nachweisen. Mit einem Satelliten macht man beim Limb Sounding das gleiche und erhält auf diese Weise Vertikalprofile. Das Verfahren ist aufgrund kleinere Hindernisse (z.B. Himalaya) für die Untersuchung der Troposphäre nicht geeignet.

Atmosphärische Transmission

§ **264** Um die Möglichkeiten und Einschränkungen der Erdfernerkundung zu verstehen, müssen wir uns mit der atmosphärischen Transmission auseinander setzen. Abbildung 3.3 zeigt das elektromagnetische Spektrum, die in verschiedenen Bereichen nachweisbaren Phänomene und die atmosphärische Transmission.

§ **265** Im sichtbaren Bereich ist die atmosphärische Transmission nahezu eins, eine Einschränkung entsteht lediglich durch die Streuung des Lichtes an den Luftmolekülen. Diese ist insbesondere bei großen Frequenzen, d.h. im blauen Bereich des sichtbaren Spektrums, von Bedeutung – wir werden dieser Dunststreuung häufiger begegnen. Geht man weiter zu kürzeren Wellenlängen, so geht die Transmission schnell gegen Null: die UV-Strahlung wird im wesentlichen von stratosphärischem Ozon absorbiert. Härtere Strahlung (EUV, Röntgen, γ) wird bereits in der höheren Atmosphäre absorbiert und sorgt dort für die Bildung der Ionosphäre. Auf Grund dieser Absorption ist es weder möglich, Röntgen- oder Gammaastronomie vom Erdboden aus zu betreiben noch den Erdboden mit Röntgen- oder γ -Instrumenten zu untersuchen.² γ s mit sehr hoher Energie können die Atmosphäre wieder passieren, sie

²Es gibt eine kleine Einschränkung zu dieser Aussage. Beim Durchgang durch Materie wird elektromagnetische Strahlung nach dem Bouguer–Lambert–Beer’schen Gesetz abgeschwächt: $I(x) = I_0 e^{-\mu x}$ mit μ als Absorptionskoeffizient und x als der Schichtdicke der durchsetzten Materie. Sehr starke Röntgen- oder Gammaquellen können daher auch nach Durchdringen der Atmosphäre in einem Detektor noch ein messbares Signal erzeugen. So wurden z.B. zur Zeit des Kalten Krieges auf militärischen Satelliten auch γ -Detektoren geflogen, um die bei Kernwaffenexplosionen emittierte Gammastrahlung nachzuweisen, z.B. Nachweis der südafrikanischen Bemühungen um Kernwaffen. Das Verfahren ist jedoch nur sinnvoll für atmosphärische

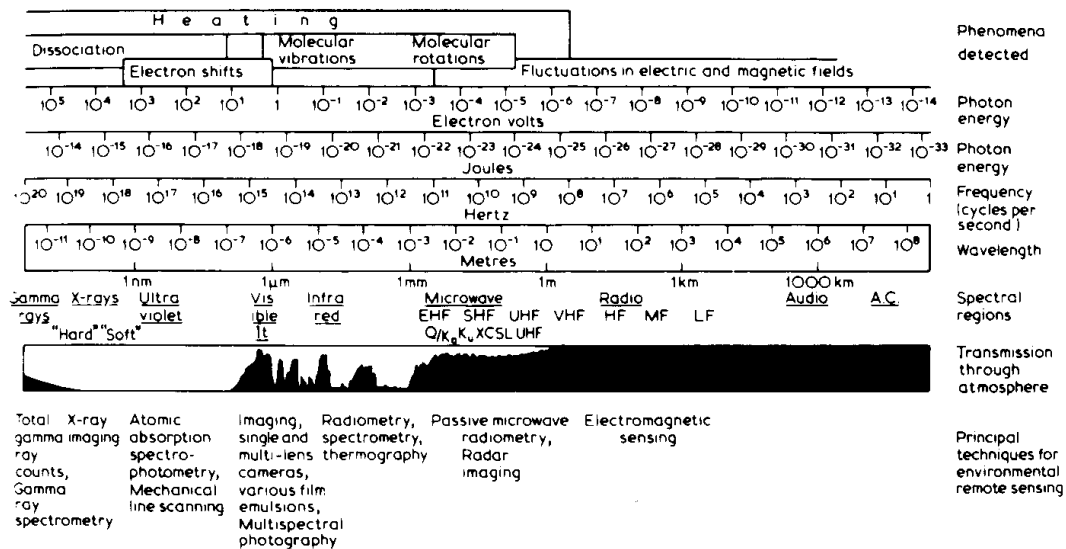


Abbildung 3.3: Elektromagnetische Spektrum, nachweisbare Phänomene und atmosphärische Transmission, [41] auf der Basis von [11]

erzeugen in der unteren Atmosphäre durch Paarbildung Elektronen und Positronen, die ihrerseits wieder γ s erzeugen, die ihrerseits wieder Paarbildung erfahren, die usw. Der Prozess wird als Luftschauer bezeichnet, ist jedoch für die Erdfernerkundung nicht von Bedeutung.

§ 266 Auch zum langwelligeren Ende des Spektrums wird die Transmission schnell gering. Im Infrarot finden sich starke Absorptionsbanden. Diese Strahlung regt in der Atmosphäre mehratomige Moleküle zum Schwingen an und wird daher absorbiert.³ In einigen Bereichen im Infrarot, in sogenannten Fenstern, ist die atmosphärische Transmission groß. Diese Bereiche werden zur Detektion der vom Erdboden bzw. Objekten am Erdboden emittierten Wärmestrahlung genutzt.

§ 267 Mit weiter zunehmender Wellenlänge wird die Atmosphäre wieder nahezu transparent, in diesem Bereich werden aktive und passive Mikrowelleninstrumente eingesetzt.

3.1.2 Die Magnetosphäre und der Sonnenwind

§ 268 Die Dichte der Atmosphäre nimmt gemäß barometrischer Höhenformel mit einigen Korrekturen ungefähr exponentiell mit der Höhe ab. Unterhalb von ca. 200 km ist die Atmosphäre noch so dicht, dass ein antriebsloser Flugkörper so stark abgebremst wird, dass er abstürzt. Oberhalb von ca. 500 km ist der Einfluss der Atmosphäre auf die Bewegung des Satelliten zu vernachlässigen.⁴ Allerdings geht dem Satelliten damit auch der durch die Atmosphäre gegenüber der kosmischen Strahlung und dem Sonnenwind gewährte Schutz verloren.

§ 269 Ein Satellit – zumindest vom Erdboden bis hinauf zum geostationären Orbit ist damit jedoch nicht schutzlos einem von der Sonne kommenden Teilchenbombardement ausgesetzt:

Kernwaffentests, unterirdische Tests lassen sich durch die von ihnen ausgelösten Wellen besser im Seismographennetzwerk nachweisen.

³Die wesentlichen Absorber sind Wasserdampf, Kohlendioxid, Methan und Stickoxide, d.h. die Spurengase, die wir in der Klimadiskussion als treibhauswirksame Spurengase bezeichnen.

⁴Und dazwischen? Entweder stürzt der Satellit früher oder später ab wie in Abschn. 2.3.2 diskutiert oder er muss, wie die International Space Station ziemlich häufig mal wieder in ein höheres Orbit gekickt werden – daher kann man die ISS auch nicht sich selbst überlassen sondern es muss immer zumindest eine Art Hausmeister an Bord sein und außerdem ein Raumtransporter zum Betanken und/oder direkten Kicken vorbei kommen [337, 768].

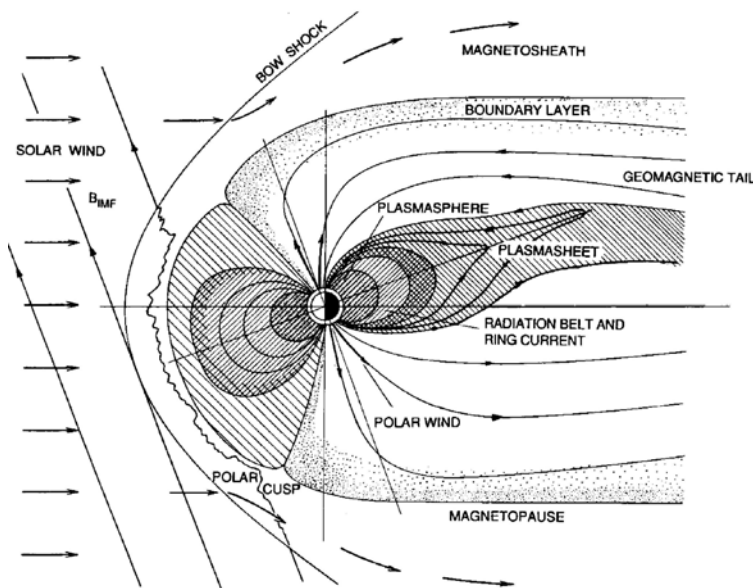


Abbildung 3.4: Struktur der Magnetosphäre [206]

während eine Atmosphäre diese Teilchen absorbiert hätte, lenkt das Erdmagnetfeld sie einfach ab. Auf diese Weise bildet das Erdmagnetfeld einen geschützten Hohlraum im Sonnenwindplasma, die Magnetosphäre.

§ 270 Auf der der Sonne zugewandten Seite erstreckt sich die Magnetosphäre bis ca. 10 Erdradien, d.h. bis jenseits des geostationären Orbits. Auf der der Sonne abgewandten Seite erstreckt sich der Schweif der Magnetosphäre bis jenseits hundert Erdradien.

§ 271 Das Erdmagnetfeld lässt sich in erster Näherung als ein Dipolfeld beschreiben. Von der Sonne strömt kontinuierlich eine Überschallströmung, der Sonnenwind, ab. Dieser verformt das Erdmagnetfeld derart, dass sich eine Topologie der Magnetosphäre wie in Abb. 3.4 ergibt: zum einen wird das Magnetfeld auf der der Sonne zugewandten Seite komprimiert, zum anderen werden Feldlinien von der der Sonne zugewandten Seite über die Polkappen in den Schweif konvektiert. Dieser Prozess ist für die Dynamik der Magnetosphäre (optisch sichtbar in Form von Polarlichtern) wichtig.

§ 272 Die unterhalb von ca. 65° geomagnetischer Breite entspringenden Feldlinien sind sowohl auf der Tag- als auch auf der Nachtseite geschlossen. Die Feldlinien in der Polkappe dagegen sind nach heutigem Verständnis offen, d.h. nicht an beiden Enden mit der Erde sondern an einem mit der Erde, am anderen jedoch mit dem interplanetaren Magnetfeld verbunden. Entlang dieser Feldlinien können energiereiche Teilchen bis in die Atmosphäre vordringen und z.B. zum Ozonabbau in hohen Breiten beitragen.

§ 273 Abbildung 3.5 zeigt die Flüsse energiereicher Elektronen auf der Nordhemisphäre aufgetragen gegen geomagnetische Koordinaten für drei verschiedene Zeiträume. Links ist der Teilcheneinfall zu ruhigen Zeiten zu erkennen; lediglich entlang des Polarovals, d.h. der äquatorwärtigen Begrenzung der Polkappe dringen Teilchen bis in die Atmosphäre vor. Bei stärkerer geomagnetischer Aktivität werden Teilchen aus den Strahlungsgürteln in die Atmosphäre injiziert – entsprechend steigen die Flüsse präzipitierender Teilchen (mittleres Teilbild). Während eines starken solaren Ereignisses wird zusätzlich die Polkappe mit Teilchen gefüllt (rechts).

§ 274 Bis auf die Polkappen ist die Magnetosphäre also ein Schutzschirm gegen energiereiche Teilchen. Allerdings ist sie selbst auch eine Quelle energiereicher Teilchen: in den Strahlungsgürteln der Erde sind energiereiche Teilchen gefangen. Die Bahnen von Satelliten zur

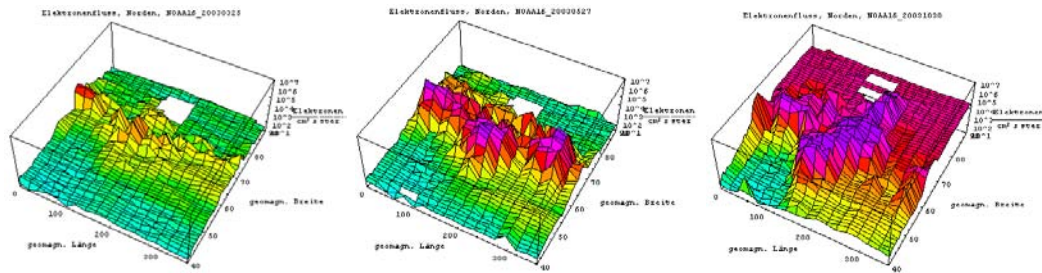
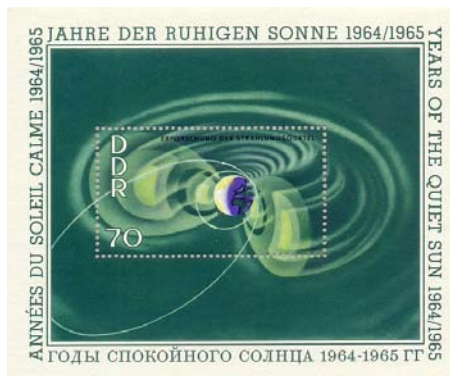


Abbildung 3.5: Präzitation energiereicher Teilchen in die Atmosphäre über der nördlichen Polarkappe; (*links*) ruhige Zeiten, kein solares Ereignis, (*Mitte*) geomagnetisch aktivere Zeiten, kaum solare Teilchen, (*rechts*) aktive (sowohl solar als auch geomagnetisch): auch die Polkappe ist mit Teilchen gefüllt; alle Daten von Space Environment Monitor SEM-2 auf POES 16

Abbildung 3.6: (Erforschung der) Strahlungsgürtel



Erforschung derselben werden gezielt in diese Strahlungsgürtel gelenkt (siehe z.B. Abb. 3.6), für die Bahnen von Forschungs- und Erderkundungssatelliten bevorzugt man dagegen Bahnen außerhalb der Strahlungsgürtel, um die mit diesen verbundene Strahlenbelastung⁵ gering zu halten. Die typischen Erdsphäer drängeln sich unterhalb der Strahlungsgürtel durch, die geostationären Satelliten dagegen liegen außerhalb der Strahlungsgürtel.

§ 275 Leider ist die Magnetosphäre nicht nur aufgrund des Sonnenwinddrucks asymmetrisch. Auch das eigentliche Erdmagnetfeld ist bereits asymmetrisch: so ist, wie bereits in Abb. 3.4 angedeutet, die Achse des geomagnetischen Dipols gegen die Erdachse gekippt⁶ sondern zusätzlich um ca. 436 km in Richtung des westlichen Pazifik verschoben. Daher kommen die Strahlungsgürtel im zusätzlichen Atlantik vor der Küste Brasiliens dichter an

⁵Die Strahlenbelastung durch energiereiche Teilchen ist physikalisch die Ionisation der durchsetzten Materie. Ionisation in der Elektronik bzw. in Datenspeichern führt im einfachsten Fall zu einem Informationsverlust, da ein Bit geklappt wurde – woraus sich allerdings schwerwiegende Folgen ergeben können, wenn die Information z.B. für die Satellitensteuerung wichtig war. Ionisation in CCDs führt zu Lichtpunkten. Insbesondere während eines Teilchensturms kann diese Ionisation so viele Pixel betreffen, dass das Bild nicht mehr zu gebrauchen ist. So wurde der Forschungssatellit CHAMP [376] in den mit dem Ereignis vom 14. Juli 2000 (Bastille-Day Event) verbundenen Teilchensturm gestartet – der für die Orientierung des Satelliten wichtige Sternensensor sah daraufhin deutlich mehr Sterne als seine Himmelslandkarte hergab und konnte erst nach Abklingen des Teilchenereignisses den Satelliten korrekt in seinem Orbit orientieren. In Sensoren und Solarzellen führt die Ionisation durch Teilchen über lange Zeiträume außerdem zu einer Degradation. Dies ist ein Problem bei der Erstellung langjähriger homogener Messreihen zur Untersuchung von global change: was ändert sich wirklich, wenn sich die Daten ändern – der gemessene Parameter, das Instrument(enverhalten) oder beides?

⁶In erster Näherung wird die Erde als eine gleichförmig der Dipolachse magnetisierte Kugel beschrieben. Diese Achse schneidet die Oberfläche in zwei Punkten, dem magnetischen Südpol bei 78.3°S 111°E in der Nähe der Vostok Station in der Antarktis und dem magnetischen Nordpol bei 78.3°N 69°W nahe Thule (Grönland). Beide Punkte sind ungefähr 800 km von den geographischen Polen entfernt; die Dipolachse des Magnetfelds ist um 11.3° gegenüber der Drehachse geneigt. Das Dipolmoment M_E der Erde beträgt 8×10^{25} G cm³ oder 8×10^{22} A m² [115].

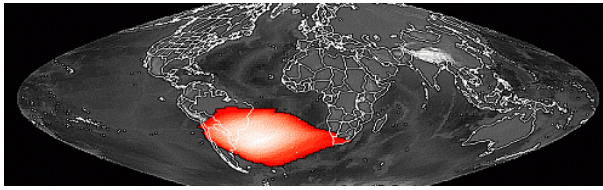


Abbildung 3.7: Südantlantische Anomalie SAA [610] als Quelle erhöhter Strahlenbelastung für Satelliten und Raumfahrer auf der ISS

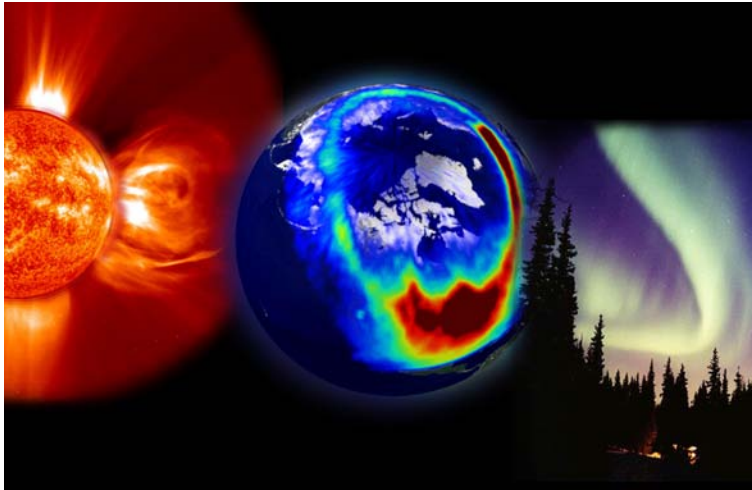


Abbildung 3.8: Solar Terrestrische Beziehungen [614]

die Erdoberfläche als an anderen geographischen Positionen. Diese Südantlantische Anomalie SAA hat man zu Beginn der Magnetosphärenforschung genutzt: hier konnten Raketen mit einer relativ geringen Flughöhe den Strahlungsgürtel erreichen. Des einen Freud, des anderen Leid: für die Raumfahrt (Satelliten und Space Shuttle) hat die SAA den Nachteil, dass die Strahlenbelastung gegenüber den anderen Teilen des Orbits erhöht ist, siehe auch Abb. 3.7.

§ 276 Die stationäre Form der Magnetosphäre wie in Abb. 3.4 ist eine Fiktion: da die äußere Grenze der Magnetosphäre, die Magnetopause, als ein Gleichgewicht aus dem magnetischen Druck des Erdmagnetfelds und dem Strömungsdruck des Sonnenwinds bestimmt ist, so verändert jede Änderung im Sonnenwinddruck, sei es durch eine Änderung der Teilchendichte oder der Strömungsgeschwindigkeit, auch die Lage der Magnetopause. Eine Erhöhung des Sonnenwinddrucks schiebt diese dichter an die Erde heran, eine Verringerung des Sonnenwinddrucks erlaubt eine Expansion der Magnetosphäre.

§ 277 Die gelegentlich von der Sonne ausgestossenen koronalen Massenauswürfe (Coronal Mass Ejection CME; linkes Teilbild in Abb. 3.8) führen zu starken Erhöhungen des Sonnenwinddrucks: die Sonnenwinddichte wird von einigen Teilchen/cm³ auf wenige 10 Teilchen/cm³ erhöht, die Strömungsgeschwindigkeit von ca. 400 km/s auf häufig mehr als 1000 km/s. Damit ergibt sich eine Erhöhung des Sonnenwinddrucks um mehr als eine Größenordnung. Als Konsequenz wird die Magnetopause komprimiert und die Magnetopause wandert auf der der Sonne zugewandten Seite bis innerhalb des geostationären Orbits: ein geostationärer Satellit befindet sich damit zwar noch auf der gleichen Flughöhe aber plötzlich nicht mehr innerhalb der Magnetosphäre sondern im interplanetaren Raum.

§ 278 Die Kompression der Magnetosphäre führt insbesondere im Schweif, d.h. auf der Nachtseite, zu einer Umstrukturierung des magnetischen Feldes. Diese ist mit einer Beschleunigung von Teilchen verbunden, die sich entlang der Magnetfeldlinien ausbreiten und im Polaroval, d.h. an den die Polkappe umgebenden Feldlinien, auf die Atmosphäre auftreffen und diese zum Leuchten anregen. Während der Satellit dies großflächig als Polaroval erkennen kann (mittleres Teilbild in Abb. 3.8), nehmen wir auf der Erde die Leuchterscheinung nur relativ lokal als Polarlicht (rechtes Teilbild in Abb. 3.8) wahr.

Mission	Instrument	Instrument Mass, Power	Comment
Landsat-5 (launch Mar. 1, 1984), NASA	TM	285 kg, 385 W	Optomechanical instrument
IRS-1C (launch Dec. 28, 1995), ISRO	LISS-III	171 kg, 78 W	Optoelectronic instrument
NEAR/Shoemaker (launch Feb. 17, 1996), NASA	MSI	7.7 kg, 6.9 W	Optoelectronic instrument
DS1 (launch Oct. 24, 1998), NASA	MICAS	12 kg	CMOS/APS technology
Landsat-7 (launch Apr. 15, '99), NASA	ETM+	425 kg, 590 W	Optomechanical instrument
IKONOS-2 (launch Sept. 24, '99), SI	OSA	171 kg, 350 W	Optoelectronic instrument
Terra (launch Dec. 18, 1999), NASA	ASTER	421 kg, 463 W	Optomechanical instrument
QuickBird-1 (launch Nov. 20, 2000), Earthwatch	BGIS 2000	380 kg, 430 W	Optoelectronic instrument (launch failure)
EO-1 (launch Nov. 21, 2000), NASA	ALI	106 kg, 100 W	Optoelectronic instrument
Diamant-1 (launch 2003), OHB-System	MSRS	70 kg, 120 W	Optoelectronic instrument
RapidEye (launch 2003 & 4) RapidEye	REIS	62 kg, 73 W	Optoelectronic instrument
PROBA (launch 2001), ESA	CHRIS	15 kg, 10 W	Optoelectronic instrument
SMART-1 (launch 2003) ESA	AMIE	0.45 kg, 0.5 W	Optoelectronic instrument
NPOESS (launch 2008)	VIIRS	160 kg, 134 W	Optomechanical instrument

Tabelle 3.1: Massen und Leistungsaufnahme einiger typischer Imaging-Instrumente (die Daten beziehen sich auf die Instrumente, nicht auf die Satelliten!) [134]

§ 279 Wie das mittlere Teilbild in Abb. 3.8 nahe legt, ist die Forschung im Bereich dieser so genannten Solar-Terrestrischen Beziehungen zumindest teilweise auch Bestandteil der Erdfernerkundung – und der plötzlich im Sonnenwind stehende geostationäre Erderkundungssatellit benötigt ein Design, dass diesen sehr veränderlichen Umgebungsbedingungen gerecht wird.

§ 280 Weitere Informationen zum Bereich Space Weather geben z.B. [361, 443, 629, 642, 702] sowie für Instrumente und Missionen Kapitel 5.

3.1.3 Ein Labor in 900 km Höhe: technische Randbedingungen

§ 281 Satelliteninstrumente verwenden Messprinzipien, die auch in Laborexperimenten bzw. teilweise im täglichen Leben Anwendung finden. Allerdings werden Satelliteninstrumente in einer Umgebung eingesetzt, die nicht ganz genau Laborbedingungen entspricht.⁷ Die Probleme umfassen neben den offensichtlichen Einschränkungen in Masse, Energieverbrauch und Datenspeicher bzw. -übertragung die mechanischen Belastungen beim Start, die thermischen Belastungen im Orbit, die schlechte Verfügbarkeit von Servicetechnikern sowie eine schnelle Alterung in einer eher ungemütlichen Umgebung.

§ 282 Um die folgenden Angaben etwas besser einordnen zu können, soll der erste kleine Piepser aus Abb. 1.8 erhalten: Sputnik 1 hatte bei einem Durchmesser von 58 cm eine Masse von 83.2 kg. Der erste amerikanische Satellit, Explorer 1, war mit einer Masse von 5 kg ein Leichtgewicht dagegen.

§ 283 Egal ob altes oder modernes Instrument, ob Satellit oder Raumfahrzeug – die Einschränkungen sind alle vergleichbar und betreffen im wesentlichen die folgenden Punkte:

- Masse
- Elektrische Versorgung
- Stabilität
- Strahlenbelastung
- Datenübertragung.

§ 284 Masse: Satelliteninstrumente müssen leicht sein – selbst ein moderner Satellit wie EnviSat mit einer Masse von 8140 kg hat nur eine Gesamtnutzlast von 2150 kg für die wissenschaftlichen Instrumente, Interfaces und Kommunikation. Ein typisches Teilchenteleskop

⁷Außer vielleicht bei jenen Optimisten, die die Ionosphäre als das der Erdoberfläche am nächsten gelegene natürliche Plasmalaboratorium bezeichnen.

mit weitem Energiebereich auf einer interplanetaren Raumsonde dagegen muss mit einer Masse von ca. 1 kg auskommen. Die Massen typischer Imaging Instrumente verschiedener Generationen sind zusammen mit deren Leistungsaufnahme in Tabelle 3.1 gegeben.

§ **285** Elektrische Versorgung: Satelliteninstrumente müssen einen geringen Stromverbrauch haben. Selbst bei einer Solarzellenfläche von 70 m² erzeugt EnviSat nur eine Leistung von maximal 6.5 kW mit einer mittleren Leistung von 1.9 kW.

§ **286** Stabilität: Satelliteninstrumente müssen mechanisch und thermisch sehr stabil sein. Beim Start mit einer Rakete oder einem Shuttle wirkt das Mehrfache der Erdbeschleunigung als systematische Kraft. Zusätzlich treten starke stochastische Kräfte durch Vibrationen und Rütteln auf. Die thermische Belastung ist beim Start gering (der Satellit befindet sich zu der Zeit noch in einer schützenden Umhüllung), erweist sich dagegen im Orbit als zu berücksichtigendes Problem: auf Grund der Ausrichtung der Instrumente auf die Erde befindet sich für längere Zeiträume eine Seite des Satelliten im Schatten während die andere der solaren Einstrahlung ausgesetzt ist. Entsprechend groß werden die Temperaturgradienten und damit auch mechanische Spannungen.

§ **287** Strahlenbelastung: Satelliteninstrumente (und insbesondere ihre Elektronik) müssen unempfindlich gegen Strahlenschäden sein. Diese entstehen durch die Ionisation durch energiereiche geladene Teilchen der kosmischen Strahlung, aus solaren Ereignissen oder aus den Strahlungsgürteln der Magnetosphäre. Am stärksten gefährdet sind Satelliten, die die Strahlungsgürtel der Erde durchfliegen – letztere geben damit gleichsam eine Obergrenze für den Orbit vor. Den Eintritt in die Südatlantische Anomalie SAA kann man jedoch zumindest für Satelliten mit sinnvoller Lebensdauer nicht vermeiden.

§ **288** Daten: Die Datenübertragung von Satelliteninstrumenten zu Bodenstationen ist eingeschränkt. So verfügt EnviSat über eine Übertragungsrate von 2 kbit/s für den Uplink, d.h. von der Bodenstation an den Satelliten für Aufforderungen wie z.B. ‘schalt mal das Instrument in den Ruhezustand’, und 4096 kbit/s für den Downlink, d.h. die eigentliche Datenübertragung. Das sind sehr große Raten im Vergleich zu den wenigen bit/s aus der Frühzeit der Raumfahrt oder bei den Voyager Missionen - im Vergleich zu den anfallenden Daten alleine im optischen Bereich sind es jedoch immer noch kleine Raten.⁸ Die Datenrate einiger Imager ist in Tab. 3.3 gegeben – hier geht es leicht in den Bereich von einigen 100 Mbit/s. Der deutsche Radarspähler TerraSAR dürfte mit 820 Mbit/s momentan der Spitzenreiter sein.

3.1.4 Grobklassifizierung und Kenngrößen

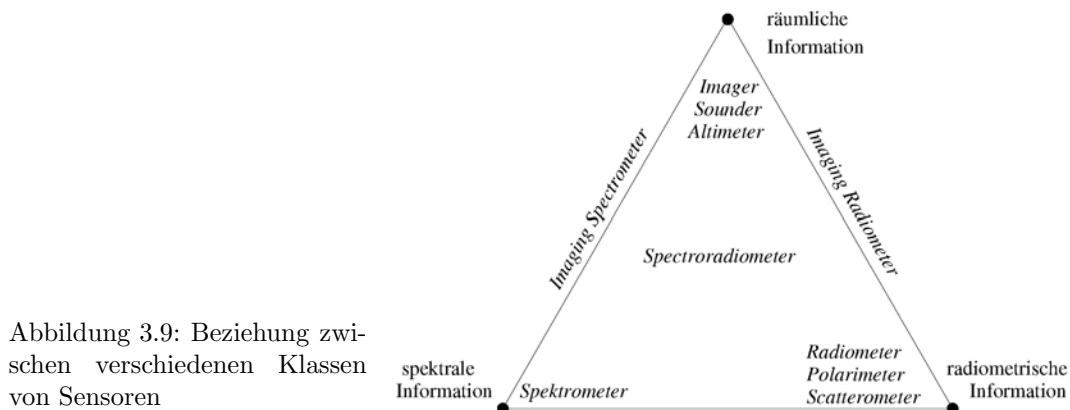
§ **289** Die Grobklassifikation von Instrumenten zur Erdfernerkundung erfolgt nach den Kriterien aktives oder passives Instrument und bildgebendes oder nicht-bildgebendes Verfahren.

§ **290** Da Erdfernerkundung, wie der Name besagt, remote sensing ist und nicht in-situ Messung, werden alle relevanten Größen indirekt, nämlich über die ausgesandte, reflektierte oder absorbierte elektromagnetische Strahlung untersucht.

§ **291** Passive Instrumente erzeugen kein Signal sondern nehmen die vom Untersuchungsgegenstand emittierte (z.B. thermisches Infrarot), partiell absorbierte (UV und Ozon, Sounding-Verfahren) oder reflektierte Strahlung (sichtbares Licht, nahes Infrarot) auf. Passive Instrumente bestehen daher aus einem Sensor und der anschließenden Auswerte-Elektronik.

§ **292** Aktive Instrumente dagegen erzeugen ein Signal (z.B. Radiowellen beim Radar) und untersuchen das reflektierte Signal bezüglich Intensität, Laufzeit, Polarisation usw. Aktive

⁸Eine simple 5 MPixel Digitalkamera erzeugt ein Bild von 2560 mal 1920 Pixel mit einer Farbtiefe von 24 Bit bzw. 8 Bit je RGB-Kanal. Als Bitmap abgespeichert hat dieses Bild eine Größe von 117 Mbit oder knapp 15 MB. Selbst bei einem Downlink von 4096 kbit/s würde die Übertragung des Bildes noch fast 29 Sekunden dauern – eine Zeit, in der sich ein typischer Erdfernerkundungssatellit um 1800 km entlang seiner Bodenspur bewegt hat.



Instrumente benötigen daher neben dem Sensor auch einen Signalgeber – und natürlich für beide die notwendige Elektronik. Aktive Satelliteninstrumente stellen höhere Anforderungen an die Stromversorgung – militärische Radarsatelliten haben früher kleine Kernreaktoren an Bord gehabt, was im Falle eines Startunfalls oder Absturz⁹ zu beträchtlichen ökologischen Folgen führen kann.

§ 293 Die wichtigsten Kenngrößen von Satelliteninstrumenten sind die Auflösungsvermögen, mit denen die verschiedenen physikalische Parameter bestimmt werden können. Man unterscheidet die folgenden Auflösungsvermögen: Bodenauflösungsvermögen, radiometrisches Auflösungsvermögen, thermisches Auflösungsvermögen und zeitliches Auflösungsvermögen.

§ 294 Schon alleine in Anbetracht der großen Datenfülle und der begrenzten zur Aufnahme zur Verfügung stehenden Zeit kann kein Instrument in allen Auflösungsvermögen optimiert sein: je mehr Pixel und Kanäle zur Verfügung stehen, um so weniger Photonen können während der Belichtungszeit in einen Kanal einfallen, so dass dieser dann durch ein hohes Rauschen und geringes radiometrisches Auflösungsvermögen wenig Informationen liefert. Außerdem ist das Verfahren Kontraproduktiv: kleine Pixel führen zwar zu einem guten Bodenauflösungsvermögen – lange Integrationszeiten zerstören dies aufgrund der Bewegung des Satelliten jedoch wieder.

§ 295 Abbildung 3.9 gibt einen Überblick über die Beziehung zwischen den verschiedenen Klassen von Instrumenten und ihren jeweiligen Auflösungsvermögen: im Zentrum das Spectroradiometer als Universalinstrument, zu den Eckpunkten jeweils an spezielle Fragestellungen angepasste und im entsprechenden Auflösungsvermögen optimierte Instrumente. Wir werden vom Film ausgehend zuerst universelle Instrumente (Spectroradiometer) betrachten, wie MSS und TM auf LandSat oder das AVHRR auf POES. Dann werden wir uns Beispielen für speziellere Instrumente zuwenden.

3.2 Passive Instrumente im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums

§ 296 Das klassische Instrument der Erdfernerkundung ist die (Mittelformat)Kamera mit ei-

⁹Nur zwei Beispiele für eine geglückte Entsorgung eines alten Radarsatelliten: Kosmos 954 stürzte 1978 über Kanada ab, Kosmos 1042 stürzte 1983 in den Indischen Ozean – in beiden Fällen führte die günstige Absturzposition dazu, dass keine Beeinträchtigungen der Anthroposphäre auftraten. In der Regel ist der Absturz ein kleineres Problem als der Startunfall: auch wenn der Satellit beim Wiedereintritt teilweise verglüht und daher mechanisch desintegriert, wird der sehr kompakte thermonukleare Reaktor in der Regel zwar erwärmt aber nicht mechanisch zerstört. Bei einem Startunfall dagegen handelt es sich meist um eine Explosion – mit der Folge, dass das im thermonuklearen Reaktor enthaltene Material sehr großflächig verteilt wird. Und handelt es sich dabei um das zwar gerne verwendete aber dennoch hochgiftige Plutonium, beginnen Bewohner Floridas selbst bei einer kleinen thermonuklearen Batterie der interplanetaren Raumsonde Cassini [455, 688, 635] die Frage nach Alternativen zu stellen.

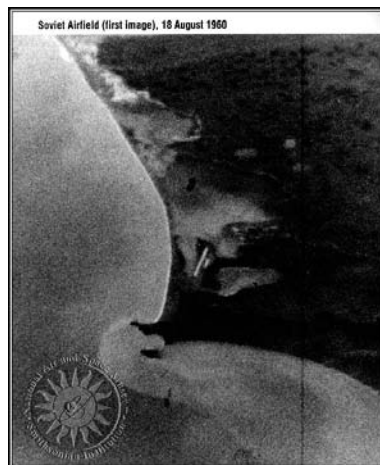


Abbildung 3.10: Frühes Beispiel für die Erdfernerkundung mit Hilfe von Satelliten: Discoverer 14 hat einen sowjetischen Flughafen photographiert [711]

nem konventionellen Film – auch wenn das erste zivile Bild der Erde aus dem Weltraum ein etwas unkonventionell erzeugtes Video war (siehe § 297). Bei der Kamera handelt es sich um ein passives Instrument, da die Kamera das vom Untersuchungsgegenstand reflektierte Sonnenlicht aufzeichnet, und um ein bildgebendes Instrument, d.h. es wird ein zwei-dimensionales Abbild des betrachteten Gegenstandes erzeugt.

3.2.1 Kurzer Rückblick

§ 297 Die ersten auf Raumfahrzeugen eingesetzten Erdfernerkundungsinstrumente waren allerdings rudimentäre Videokameras. Das erste Bild aus dem Orbit wurde, mit einer sehr schlechten Auflösung, 1959 vom US-Satelliten Explorer 6 [519] mit einer TV-Kamera aus einem Hohlspiegel und einem Phototransistor [595] aufgenommen: die Rotation des spin-stabilisierten Explorer lieferte einen Scan senkrecht zur Flugrichtung (entsprechend einer Zeile eines Fernsehbildes), die Bewegung entlang seiner Bahn lieferte die einzelnen Zeilen. Die Übertragung dieses ersten Fernsehbildes dauerte nahezu 40 min. Das erste Farbbild aus dem Orbit war ebenfalls eine Video-Aufnahme, 1967 vom sowjetischen Molniya 1 Satelliten gemacht.

§ 298 Der Großteil der frühen Erdaufnahmen ist wurde jedoch konventionell mit Kamera und Film gemacht: im August 1960 gelang es dem Satelliten Discoverer 14 (CORONA [632, 722], militärische Aufklärungssatelliten der USA) erstmals einen im Orbit belichteten Film erfolgreich zur Erde zurück zu senden – der Film wurde in der Luft abgefangen, ein Resultat ist in Abb. 3.10 gezeigt. Während der folgenden 12 Jahre, bis März 1972, wurden 95 weitere CORONA Missionen geflogen. Dieses Konzept der Filmrückführung wurde erste 1976 mit den KH-Satelliten (KeyHole [633, 718, 752, 753, 754]) zu Gunsten opto-elektronischer Aufnahmetechniken aufgegeben, die alten militärischen Aufnahmen wurden Mitte der Neunziger Jahre deklassifiziert,¹⁰ so dass sie jetzt auch zivilen Nutzern zur Verfügung stehen und damit den Zeitraum kontinuierlicher Erdbeobachtung um mehr als eine Dekade rückwärts verlegen.

§ 299 Der erste Photosatellit der UdSSR, Zenit, wurde 1962 gestartet und trug ein bei VEB Carl-Zeiss-Jena gebautes Instrument, die MKF-6 (Multi-Kanal-Fotografie-6 [286, 288], siehe Abb. 3.11), das das Grundprinzip der modernen Erdfernerkundung prägen wird: eine Multispektralkamera aus sechs, in einem 2 mal 3 Raster montierten Einzelkameras, die mit unterschiedlichen Filtern im Spektralbereich von 0.45–0.9 μm , d.h. bis ins nahe IR hinein, ausgestattet jeweils die gleiche Szene aufnehmen. Diese Kameras wurden auch auf bemannten

¹⁰Nähere Informationen und Beispielbilder unter [633, 706, 711, 718, 752, 753, 754], andere Beispiele und eine Diskussion militärischer Aufklärung, inkl. U-2, unter [609, 758].



Abbildung 3.11: MKF-6 Kamera auf Interkosmos

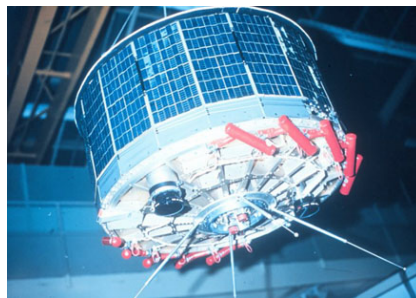
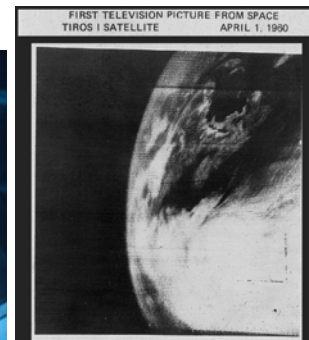


Abbildung 3.12: TIROS Modell und frühe Video-Aufnahme von TIROS I aus



Missionen und von Flugzeugen eingesetzt. Und die mit der MKF-6 gewonnenen Erfahrungen haben uns auch die 3D-Bilder von Mars Express [293, 340] beschert [339].

§ 300 Konventionelle Filmaufnahmen haben den Nachteil der erforderlichen Rückführung des Filmmaterials. Daher wurde, trotz deutlich reduzierter Qualität der Aufnahmen, bereits Mitte der Sechziger Jahre mit der Verwendung von Video-Kameras experimentiert, z.B. aus den meteorologischen Satelliten der TIROS-Serie ([588, 590], erster Start 1960, Satellit und ein Beispiel in Abb. 3.12), auf den ersten Landsats (ab 1972 [534, 535, 536, 565, 566, 567]) sowie auf ESSA (ab 1966, [506, 517]), DMSP (ab 1965, [511, 601]) und Meteor (ab 1969, [512, 548]).

§ 301 Den Durchbruch in der Datenaufnahme brachten die CCDs, die die Entwicklung fortschrittlicher Scanner ebenso wie der Multispektralverfahren erlaubten. Die ersten auf der Basis dieser Technologie eingesetzten Instrumente wurden auf Flugzeugen eingesetzt, ihre Weiterentwicklung, der MSS [552, 553, 554, 555, 556], wurde mit Beginn der LandSat-Serie 1972 auch auf Satelliten geflogen. Aus diesem Urmodell sind viele Weiterentwicklungen entstanden, von denen wir einige weiter unten genauer betrachten werden. Der LandSat Multispektralscanner MSS ist für Langzeituntersuchungen im Rahmen des global change bzw. cli-

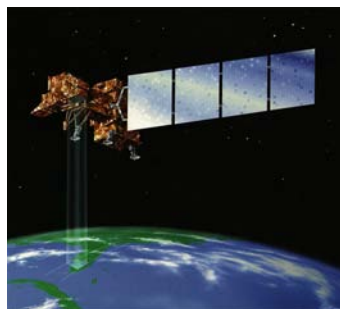
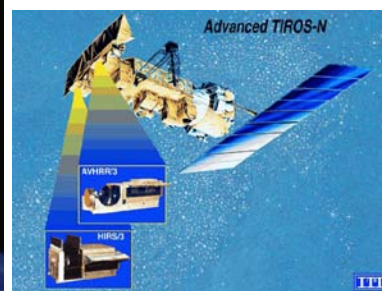


Abbildung 3.13: Moderne Fernerkundungssatelliten: LandSat 7 (*links*) und TIROS N (*rechts*)



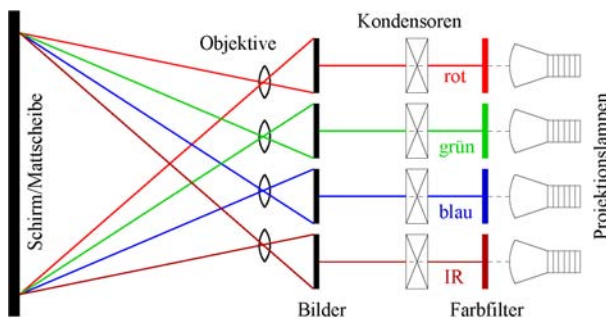


Abbildung 3.14: Farbmischprojektor: Rekonstruktion eines Farb- oder Falschfarbenbildes aus mehreren mit unterschiedlichen Filtern belichteten S/W-Filmen – ok, die optischen Achsen sollten vielleicht auf einen gemeinsamen Bezugspunkt ausgerichtet sein

mate change von so großer Bedeutung, dass LandSat 5 [538] als der letzte einen MSS tragende LandSat nach über 20 Dienstjahren immer noch aktiv ist. Bis vor wenigen Jahren wurde sogar LandSat 4 noch als Reserveeinheit für LandSat 5 im gebrauchsfähigen Zustand gehalten. Zur Zeit wird über Landsat Data Continuity Mission LDCM diskutiert [424, 708, 709].

§ 302 Aber allen Unkenrufen zum Trotz scheint der konventionelle Film auch in der Erdfernerkundung zwar in eine Nische gedrängt zu werden aber nicht zu verschwinden. Die russische Resurs-Serie (siehe auch Tab. 3.3, [370], ab 1989 [563] bis mindestens 1999 [564]) trägt mit der KFA-1000 (dargestellt z.B. in [81]) wieder ein konventionelles photographisches System – was sich im Vergleich mit den digitalen Systemen recht wacker schlägt [110].

3.2.2 Kameratypen

§ 303 Ein konventionelles photographisches System besteht aus einer Kamera mit einem Objektiv und einer photographischen Emulsion. Die Eigenschaften dieses Systems werden durch die Art der Kamera, die Abbildungseigenschaften des Objektivs und die Eigenschaften der photographischen Emulsion beschrieben.

§ 304 Kameras lassen sich einteilen in Einzelobjektivkameras, mehrlinsige Kameras (Multispektralkameras, MFK-6 in Abb. 3.11 ist ein frühes Beispiel), Streifenkameras und Panoramakameras. Bei der Einzelobjektivkamera handelt es sich um einen ganz normalen Photoapparat mit eben einem Objektiv. Um ein gutes Bodenaufklärungsvermögen zu erreichen, werden meistens größere Negativformate als in der konventionellen Photographie verwendet mit Filmbreiten bis zu 19 cm [133, 254], verglichen mit den 2.4 cm eines konventionellen Rollfilms. Derartige Kameras werden vielfach als Handkameras bei bemannten Missionen (Gemini, SkyLab, Spacelab, Space Shuttle) verwendet, auf dem Space Shuttle hat sich eine modifizierte Hasselblad-Mittelformatkamera mit 6 cm Negativformat durchgesetzt – auch die Aufnahme von Fessan in Abb. 1.1 ist mit einer Hasselblad gemacht.

§ 305 Die mehrlinsige Kamera wird auch als Multispektralkamera bezeichnet. Sie besteht aus mehreren, miteinander gekoppelten identischen Kameras, die gleichzeitig ausgelöst werden. Jedes der Objektive hat den gleichen Blickwinkel, die gleiche Brennweite und beobachtet das gleiche Gebiet – eine Anordnung ist die 2×3 -Matrix der MFK-6 wie in Abb. 3.11. Jedes Objektiv ist mit einem anderen Filter versehen, so dass gleichzeitig Aufnahmen eines Gebietes in verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums gemacht werden – im Prinzip erhält man die einzelnen Schichten eines Farbfilms. Je nach Filter können in den einzelnen Kameras der Multispektralkamera auch unterschiedliche Filmmaterialien verwendet werden. Anstelle eines einzigen Farb- oder Schwarz-Weiß-Films erhält man auf diese Weise Schwarz-Weiß-Filme, die sich in Grauton und Dichte je nach Intensität der einzelnen Spektralbereiche unterscheiden.

§ 306 Der entscheidende Vorteil der Multispektralkamera gegenüber einer einlinsigen Kamera mit einem Farbfilm liegt in der photographischen Emulsion: Schwarz-Weiß-Filme sind

empfindlicher und feiner als Farbfilme, was zu einem besseren Auflösungsvermögen und Kontrast führt. Die Farbinformation wird durch die verschiedenen Filter vor den einzelnen Kameras erzeugt. Zusätzlich haben diese Kameras den Vorteil, dass sie bei entsprechenden Filtern auch in Wellenlängenbereichen sehen können, in denen das menschliche Auge nicht empfindlich ist (nahes Infrarot), und dass Wellenlängen, die stark dunstempfindlich sind (blau), beim späteren Zusammenmischen weg gelassen werden können. Dadurch wirkt sich die atmosphärische Streuung nicht so negativ auf das Auflösungsvermögen aus, für Beispiele siehe z.B. [209], ebenso Abb. 3.16 und 3.47 sowie Abschn. 7.1.6.

§ 307 Die Multispektralkamera ist in der Analog-Photographie das Äquivalent der modernen Multispektralscanner: beide eröffnen gegenüber dem panchromatischen bzw. dem Farbfilm die Möglichkeit, die Wellenlänge als zusätzliche Dimension im Parameterraum einzuführen. Und insbesondere der Vergleich verschiedener Wellenlängen ermöglicht, wie bei der konventionellen Spektroskopie, eine genaue(re) Identifikation des betrachteten Objekts.

§ 308 Das Original lässt sich aus diesen Bildern durch die Verwendung eines Farbmischprojektors rekonstruieren (siehe Abb. 3.14). Die auf diese Weise zusammengesetzten Bilder können in den ‘echten’ Farben erzeugt werden oder je nach Kombination von Filmen und Filtern auch als Falschfarbenbilder. Letztere Methode kann zur besseren Darstellung relativ geringer Kontraste oder zur Darstellung des Infrarotanteils verwendet werden.

§ 309 Die Streifenkamera wird nur in der militärischen Aufklärung verwendet. Hier bleibt der Verschluss der Kamera offen und der Film wird mit hoher Geschwindigkeit bewegt. Im Prinzip ist die Streifenkamera die Vorwegnahme der Kehrbesentechnik mit analogen Mitteln.

§ 310 Bei der Panoramakamera ist das Objektiv beweglich oder einem starren Objektiv ist ein bewegliches Prisma vorgesetzt, wodurch das Blickfeld des Satelliten in Streifen, die senkrecht zur Flugrichtung liegen, abgetastet wird. Der Nachteil dieses Verfahrens ist die Verzerrung zu den Seiten dieser Streifen, der Vorteil liegt in der schnellen Abtastung großer Flächen (normalerweise wird nur ein relativ schmaler Streifen, die Swath Width, entlang der Bodenspur von der Kamera eingesehen).

3.2.3 Abbildung durch Objektive

§ 311 Photographische Objektive sind aus mehreren Linsen aufgebaut, da (a) eine einzelne Linse zu dick wäre und (b) auf diese Weise Linsenfehler und chromatische Effekte verringert werden können. Die Abbildung lässt sich durch die Linsengleichung beschreiben.

§ 312 Mit f als der Brennweite der Linse, g als dem Abstand zwischen Objekt und Linse (Gegenstandsweite, entspricht der Flughöhe h) und b als dem Abstand zwischen Linse und Filmebene (Bildweite) gilt

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b} .$$

Bei Satellitenbeobachtungen betragen die typischen Objektweiten g einige hundert Kilometer, während die Brennweiten und der Abstand Linse – Filmebene nur im Bereich von Zentimetern oder Dezimetern liegen. Dann gilt $f \approx b$, d.h. der Abstand Linse – Filmebene ist gleich der Brennweite. Für das Verhältnis aus Gegenstandsgröße G und Bildgröße B (Abbildungsmaßstab) ergibt sich

$$\frac{B}{G} = \frac{b}{g} = \frac{b}{h} ,$$

bzw. unter Berücksichtigung von $f \approx b$

$$\frac{B}{G} = \frac{f}{h} . \tag{3.1}$$

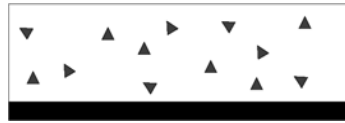


Abbildung 3.15: Schwarz-Weiß-Film

§ **313** Für den Abbildungsmaßstab, und damit auch für das Bodenaufklärungsvermögen, ist daher bei vorgegebener Flughöhe die Brennweite von entscheidender Bedeutung. Für zivile Satellitenkameras liegen die Brennweiten im Bereich von 44 mm (Multispektralkamera UdSSR [254]) über 80 mm (NASA-Hasselblad, z.B. Apollo) und 305 mm (Zeiss-Kamera, SpaceLab [154, 748]) bis hin zu 450 mm (Earth Terrain Camera auf SkyLab [209]). Insbesondere im militärischen, heute aber auch im zivilen Bereich werden auch Objektive mit Brennweiten im Bereich von Metern verwendet (Spiegelobjektive). In Abhängigkeit von der Brennweite verändert sich der Öffnungswinkel der Objektive und damit die Fläche, die eingesehen werden kann. Für die oben gegebenen Beispiele liegen die Blickwinkel zwischen ca. 135° und 45° ; mit verbesserter Bodenaufklärung auch kleiner, siehe Tab. 3.3.

§ **314** Das Blickfeld F_B einer Satellitenkamera lässt sich aus (3.1) durch Ersetzen der Bildgröße B durch die Kantenlänge k des Films bestimmen

$$F_B = \frac{g \cdot k}{f} = \frac{h \cdot k}{f}.$$

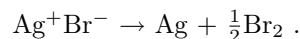
Für typische zivile Anwendungen liegen die Blickfelder in Bereichen zwischen 80 und 200 km bei den älteren Satelliten, in der Größenordnung von 30–50 km bei den modernen Kommerziellen, siehe auch Tab. 3.3.

3.2.4 Aufzeichnung der Abbildung: photographische Emulsion

§ **315** Die Aufzeichnung mit photographischen Emulsionen wird in der modernen Erdfernerkundung von bemannten Stationen aus betrieben (Filmrückführung lässt sich einfach lösen), auf einigen Aufklärungssatelliten (KH-11) soll es mindestens bis zur Mitte der 1980er Jahre noch Filmmaterialien geben haben.

Schwarz-Weiß-Film

§ **316** Die wichtigste photographische Emulsion ist der Schwarz-Weiß-Film. Dieser besteht aus einer Gelatineschicht mit einer Dicke von ca. $100 \mu\text{m}$, in die Silberhalogenidkörnchen (AgBr, auch AgJ oder AgCl) von einer Größe von 1 bis $10 \mu\text{m}$ eingebettet sind, siehe auch Abb. 3.15. Diese Schicht befindet sich auf einer Trägerschicht, die die mechanische Stabilität gewährleisten soll. Auftreffende elektromagnetische Strahlung bewirkt durch Ionisation des Br^- (Photoeffekt) eine Aufspaltung in Silber- und Bromatome:



Normalerweise kehrt sich diese Reaktion von selbst wieder um. Wenn jedoch innerhalb eines Körnchens eine ausreichende Zahl von Silberatomen (typischerweise 4) geformt wurde, ist dieser Vorgang irreversibel und der Film enthält ein latentes Bild. Dieses latente Bild wird durch die Entwicklung fixiert (Negativ).

§ **317** Da zur Auslösung der Reaktion das Photon eine Mindestenergie haben muss, gibt es auch eine maximale Wellenlänge, bis zu der ein Schwarz-Weiß-Film empfindlich ist. Diese liegt im Bereich von 0.4 bis $0.5 \mu\text{m}$. Schwarz-Weiß-Filme sprechen daher auf den blauen, violetten und den UV-Teil des Spektrums an. Panchromatische Schwarz-Weiß-Filme werden besonders empfindlich gemacht, um auf den ganzen Bereich des sichtbaren Spektrums anzusprechen. Da der UV- und der Blauanteil stark dunstempfindlich sind, werden diese Wellenlängen häufig durch den Vorsatz eines Filters ausgeschaltet; Abb. 3.16 demonstriert das Verschwinden des Dunstschleiers in der rechten Aufnahme mit einem Infrarotfilm gegenüber



Abbildung 3.16: Auf der Aufnahme Interlakens vom Niesen aus wird im panchromatischen Schwarz-Weiß-Film (*links*) die Dunststreuung deutlich; die Aufnahme mit einem Infrarotfilm (*rechts*) ist dagegen unbeeinträchtigt von Dunststreuung [104]

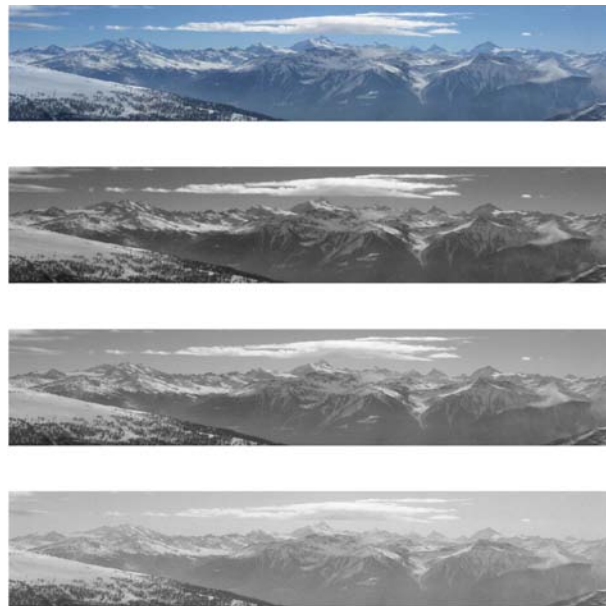


Abbildung 3.17: Originalbild (*oben*) zerlegt in seine Schichten: rot (*zweite Reihe*), grün (*dritte Reihe*) und blau (*unten*)

der im linken Teil gezeigten Aufnahme mit einem konventionellen Schwarz-Weiß-Film recht eindrucklich. Allerdings gibt es auch Filme, die gezielt für die UV-Photographie gedacht sind. Diese können nur bei sehr klarem Wetter und bei geringen Flughöhen eingesetzt werden. Ein Anwendungsbeispiel ist die Feststellung von Ölflecken auf Wasser.

Verständnisfrage 22 Abbildung 3.16 ist recht eindrucklich – aber lässt sich das Ergebnis überhaupt auf eine Luftaufnahme bzw. auf eine Aufnahme vom Satelliten aus übertragen? Oder anders gefragt: ist die Dunsstreuung in 20 km horizontaler Luftsäule vergleichbar mit der in der vertikalen Luftsäule der Atmosphäre?

§ **318** Die Abhängigkeit der Dunststreuung von der Wellenlänge kann man sich auch mit Hilfe eines einfachen Photos einer Digitalkamera veranschaulichen. Dazu zeigt Abb. 3.17 im oberen Teil eine Szene in natürlichen Farben. Darunter sind die drei Farbkanäle der Kamera getrennt dargestellt in der Reihenfolge rot, grün und blau. Im unteren Teilbild (blauer Kanal) wird die Dunststreuung besonders deutlich, insbesondere die Zunahme mit zunehmendem Abstand des Motivs. Im roten Kanal dagegen ist das Bild kaum durch Dunst beeinträchtigt: auch in größeren Entfernungen (bis zu den Berggipfeln im Hintergrund sind es ca. 50 km) zeigt sich keine durch Dunststreuung bedingte Verringerung des Kontrastes. Außerdem zeichnen sich die Wolken wesentlich deutlicher ab. Zu Zeiten der konventionellen Schwarz-Weiß-Photographie war man sich dieser Einflüsse sehr wohl bewusst und hat ein Gelbfilter verwendet, um die Dunststreuung zu unterdrücken.

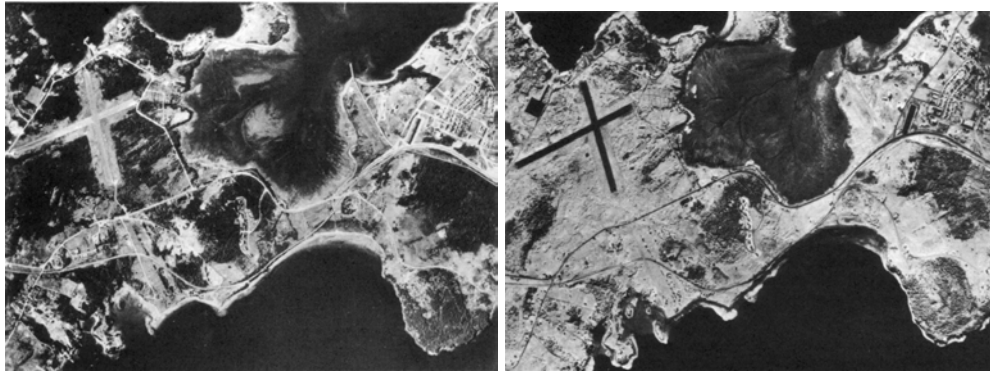


Abbildung 3.18: Panchromatische Aufnahme (links) im Vergleich zur Aufnahme mit einem Infrarotfilm [209]

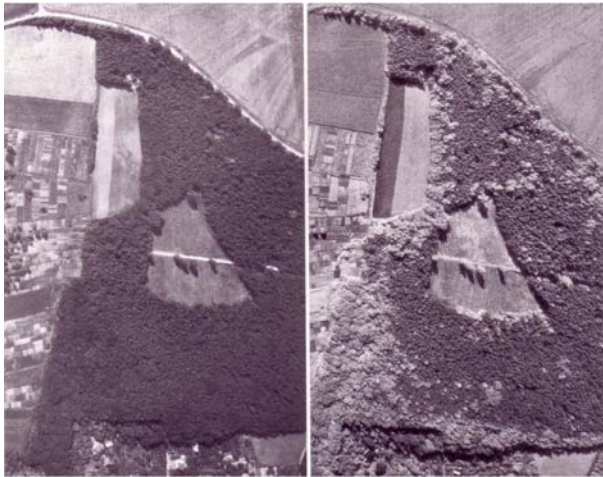


Abbildung 3.19: Vegetation panchromatisch und im Infrarotfilm [154]

§ 319 Beim Infrarotfilm wird die Filmempfindlichkeit bis in den infraroten Bereich ausgedehnt, allerdings bleibt der Film auch für den gesamten sichtbaren und den UV-Bereich empfindlich. Häufig wird daher der für atmosphärische Streuung besonders empfindliche kurzwellige Bereich durch Filter ausgeschaltet. Der Film zeigt dann in verschiedenen Graustufen den Bereich von grün bis zum nahen Infrarot, die maximale Wellenlänge liegt im nahen Infrarot bei $0.9 \mu\text{m}$. Die Verwendung eines Infrarotfilms eignet sich insbesondere für Vegetationsuntersuchungen aber auch zur Kontrastanreicherung zwischen Vegetation und anderen Strukturen: so ist im der panchromatischen Aufnahme im linken Teil von Abb. 3.18 der Kontrast zwischen Landebahn und umgebenden Grasfläche nur gering während im Infrarotfilm auf der rechten Seite die Landebahn deutlich gegen das Gras abgehoben ist. Dafür ist Wald und Gras nicht so einfach zu unterscheiden wie auf dem panchromatischen Film – die Wahl des Films hängt also von der Fragestellung ab.

§ 320 Aber nicht nur der Unterschied zwischen Vegetation und Landebahn wird im Infrarotfilm deutlicher, auch die Details der Vegetation. Während in der panchromatischen Aufnahme im linken Teil von Abb. 3.19 die Bäume alle gleich aussehen, zeigen sich im Infrarotfilm (rechtes Teilbild) deutliche Unterschiede zwischen den Pflanzen am Rand des Wäldchens und denen in dessen Zentrum, Zeichen für Unterschiede in der Pflanzengesundheit und/oder -ernährung.

Farbfilm

§ 321 Farbfilme bestehen im Gegensatz zum Schwarz-Weiß- oder Infrarotfilm nicht aus ei-

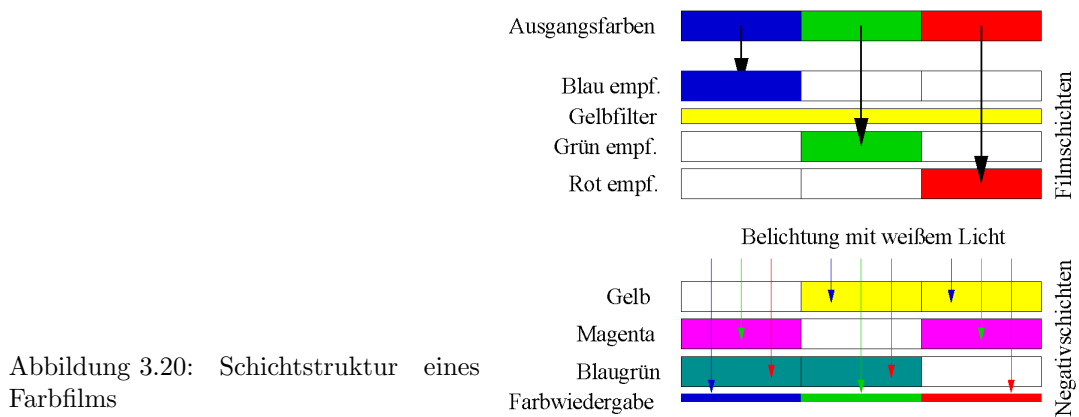


Abbildung 3.20: Schichtstruktur eines Farbfilms

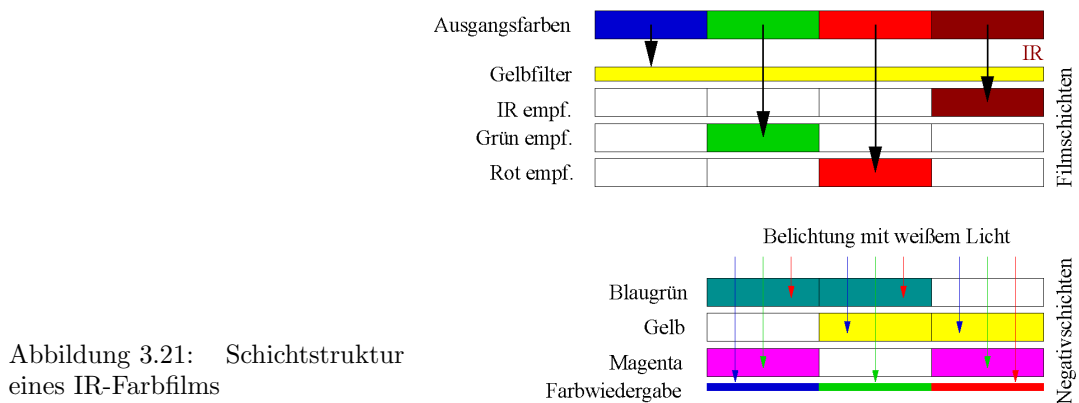


Abbildung 3.21: Schichtstruktur eines IR-Farbfilms

ner sondern aus drei oder mehr photosensitiven Schichten. Diese sind in unterschiedlichen Spektral- bzw. Farbbereichen empfindlich, vgl. Abb. 3.20. Die Schicht eines konventionellen Farbfilms sind, von oben nach unten, blauempfindlich ($0.4\text{--}0.5\ \mu\text{m}$), grünempfindlich ($0.5\text{--}0.6\ \mu\text{m}$) und rotempfindlich ($0.6\text{--}0.7\ \mu\text{m}$). Da die rot- und grünempfindlichen Schichten auch für blaues Licht empfindlich sind, befindet sich hinter der blauempfindlichen Schicht ein Gelbfilter.

§ 322 Nach der Entwicklung entstehen aus diesen Schichten die Komplementfarben. Wie beim Schwarz-Weiß-Film ist auch hier wieder die Schwärzungsdichte der einzelnen Negativschichten proportional der Intensität der einfallenden Strahlung. Durch die Belichtung mit weißem Licht auf photosensitives Papier lassen sich Positive erstellen.

Nahes Infrarot: Falschfarbenaufnahme

§ 323 Ein Spezialfall des Farbfilms ist der Infrarotfarbfilm. Bei ihm ist die obere photosensitive Schicht gegen Infrarot empfindlich und nicht, wie beim normalen Farbfilm, gegen Blau (vgl. Abb. 3.21). Die Schichten decken daher den Bereich vom nahen Infrarot bis Grün ab, der Blauanteil geht, wie auch beim Infrarotfilm, vollständig verloren. Der Gelbfilter muss daher vor der obersten Schicht des Filmes liegen.

§ 324 Während beim normalen Farbfilm eine Wiedergabe in den normalen Farben erfolgen kann, ist dies beim Infrarotfilm nicht sinnvoll: zum einen fehlt der blaue Anteil, zum anderen ist die Information für den nicht sichtbaren Infrarotanteil vorhanden. Beim infrarotempfindlichen Schwarz-Weiß-Film entsteht dadurch kein Problem, da die Abbildung nur in Grautönen erfolgt. Beim Farbfilm bedient man sich einer willkürlichen Zuordnung der einzelnen Schichten zu Farben, so dass für jede der Schichten eine der drei Primärfarben Blau, Grün und Rot verwendet wird. Die Zuordnung zwischen diesen Farben und den Schichten ist willkürlich. Die gängige Zuordnung bildet den infraroten Teil rot ab. Damit muss für das sichtbare Rot

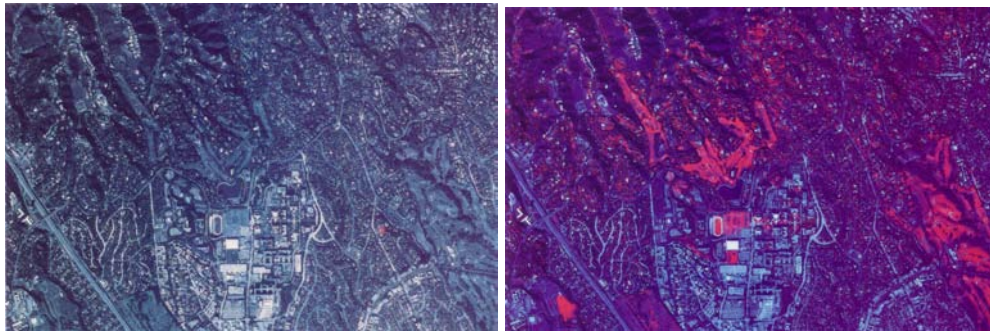


Abbildung 3.22: Vergleich einer Szene in konventioneller Farbaufnahme (*links*) und Falschfarbaufnahme (*rechts*) mit einem IR-Farbfilm [209]



Abbildung 3.23: Aufnahme mit konventionellem CCD liefert RGB-Bild: Grauwerte in den drei Schichten Rot (*links*), Grün (*Mitte*) und Blau (*rechts*)

eine andere Farbe gewählt werden, in der Regel Grün. Für den verbleibenden grünen Bereich wird das nicht mit aufgenommene Blau verwendet. die reihenfolge im spektrum wird bei dieser Darstellung nicht verändert, es werden nur alle Kanäle in den sichtbaren Bereich verschoben. Auf diese Weise wird ein Falschfarbenbild erzeugt.

§ **325** Bei der konventionellen Zuordnung der Schichten in der Falschfarbendarstellung wird die Vegetation auf Grund ihres hohen spektralen Reflektionsvermögens im nahen IR rot abgebildet. Ein Beispiel für eine städtische Szene ist in Abb. 3.22 gezeigt. Dort zeichnet sich z.B. das Stadium in der Bildmitte im Falschfarbenbild wesentlich deutlicher ab als im normalen Farbbild.

§ **326** Falschfarbenaufnahmen lassen sich im Zeitalter der digitalen Photographie am Rechner auf einfache Weise simulieren. Die normale CCD (siehe auch Abb. 3.40) hat entsprechend dem konventionellen Farbfilm Pixel, die in verschiedenen Wellenlängenbereichen empfindlich sind – und zwar wieder konventionell im RGB-Schema, d.h. Rot–Grün–Blau. Jede Szene erzeugt in den einzelnen Wellenlängenbereichen ein Helligkeitsmuster, wie im Beispiel in Abb. 3.23 gezeigt und bereits in Abb. 3.17 verwendet. Die konventionelle Zuordnung dieser Helligkeitsmuster zu den Farben liefert das unverfälschte Bild im linken Teil von Abb. 3.24;

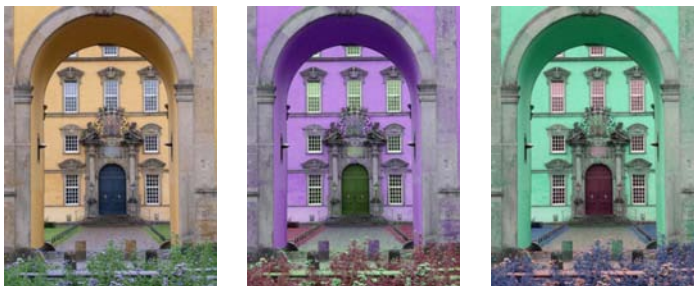


Abbildung 3.24: Die RGB-Schichten aus Abb. 3.23 sind auf konventionelle Reihenfolge sowie in der Reihenfolge GBR bzw. BRG gemischt (Technik siehe Abschn. 9.2)

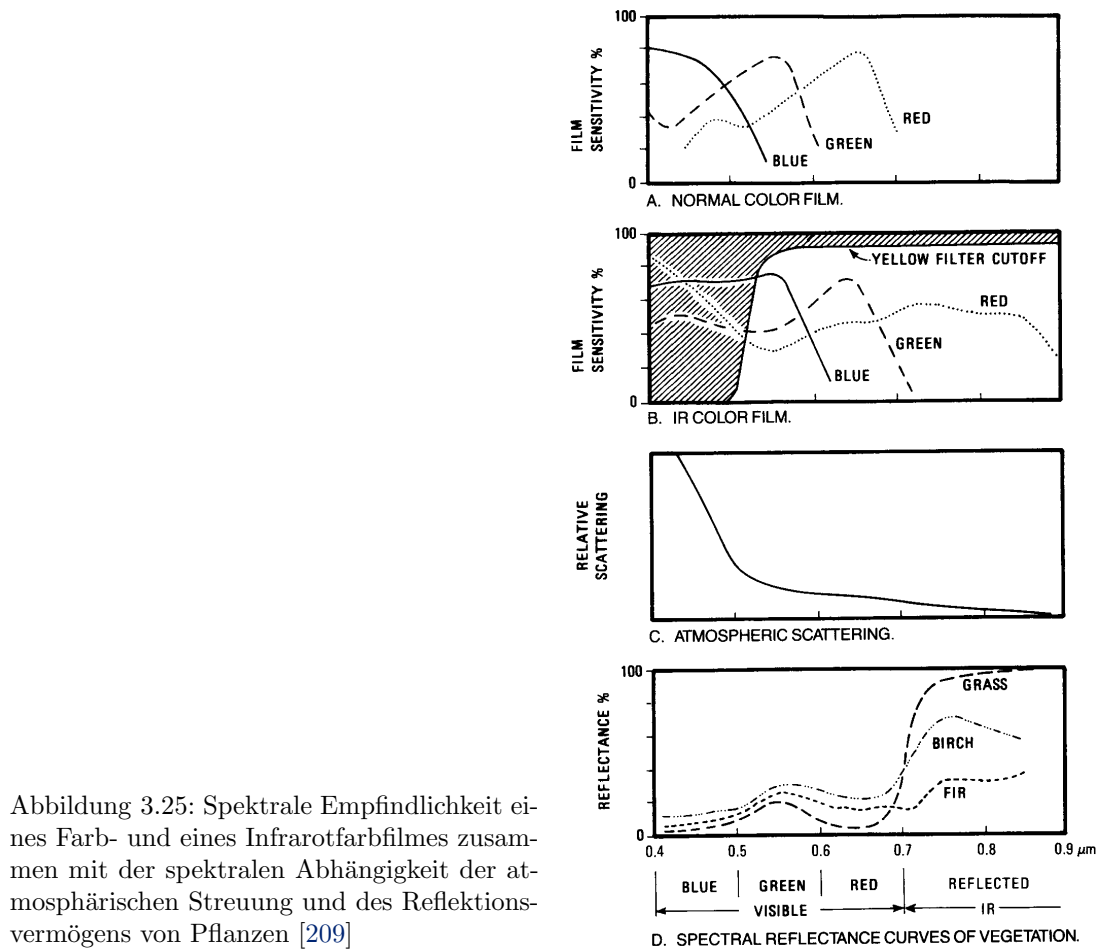


Abbildung 3.25: Spektrale Empfindlichkeit eines Farb- und eines Infrarotfarbfilmes zusammen mit der spektralen Abhängigkeit der atmosphärischen Streuung und des Reflektionsvermögens von Pflanzen [209]

Permutationen der Schichten, d.h. Zuordnung der Helligkeitswerte zu jeweils einer anderen Schicht, liefern die nicht ganz farbgetreuen Varianten.

3.2.5 Warum Falschfarben?

§ 327 Sowohl bei den Schwarz-Weiß- als auch bei den Farbfilmen gibt es jeweils auch Varianten, die im nahen Infrarot empfindlich sind. Was ist nun das Interessante an diesem Bereich, der für das menschliche Auge nicht mehr wahrnehmbar ist, bzw. durch Falschfarbenbilder sichtbar gemacht werden muss? Bevor wir diesen Punkt diskutieren, sollten wir uns noch einmal klar machen, dass wir hier Sensoren besprechen, die die reflektierte Infrarotstrahlung der Sonne aufzeichnen, nicht aber um Sensoren, die das thermische Infrarot (d.h. die von terrestrischen Gegenständen abgegebene Wärmestrahlung) erkennen können.

§ 328 Abbildung 3.25 zeigt dazu die spektrale Empfindlichkeit eines Farbfilms (A) bzw. eines Infrarotfarbfilms (B). Kurve (C) zeigt die Streuung in der Atmosphäre in Abhängigkeit von der Wellenlänge: Die Streuung ist am stärksten im blauen Licht (Dunststreuung), mit zunehmender Wellenlänge wirkt sich die atmosphärische Streuung immer weniger aus, so dass sich kontrastreichere Aufnahmen erzeugen lassen – das haben wir bereits Beispiel in Abb. 3.17 kennen gelernt.

§ 329 Der zweite Vorteil der Verwendung des nahen Infrarot wird aus dem unteren Teil von Abb. 3.25 deutlich: Gerade beim Übergang vom sichtbaren zum infraroten Bereich ändern sich die Reflektionseigenschaften vieler Materialien sehr stark. Im Infraroten erzeugen Pflanzen ein relativ starkes Signal (wesentlich deutlicher als im sichtbaren Bereich, damit lässt

	0.5 – 0.6 μm	0.6 – 0.7 μm	0.7 – 0.8 μm	0.8 – 1.1 μm
<i>Fels, Boden(bedeckung)</i>				
Sand	5.19	4.32	3.46	6.71
Lehm (1% Wasser)	6.70	6.79	6.10	14.01
Lehm (20% Wasser)	4.21	4.02	3.38	7.57
Eis	18.30	16.10	12.20	11.00
Schnee	19.10	15.00	10.90	9.20
Kultiviertes Land	3.27	2.39	1.58	????
Ton	14.34	14.40	11.99	????
Gneiss	7.02	6.54	5.37	10.70
lockerer Boden	7.40	6.91	5.68	????
<i>Vegetation</i>				
Weizen (wenig gedüngt)	3.44	2.27	3.56	8.95
Weizen (stark gedüngt)	3.69	2.58	3.67	9.29
Wasser	3.75	2.24	1.20	1.89
Gerste (gesund)	3.96	4.07	4.47	9.29
Gerste (Mehltau)	4.42	4.07	5.16	11.60
Hafer	4.02	2.25	3.50	9.64
Hafer	3.21	2.20	3.27	9.46
Soja (viel Wasser)	3.29	2.78	4.11	8.67
Soja (wenig Wasser)	3.35	2.60	3.92	11.01

Tabelle 3.2: Spektralabhängigkeit des Reflektionsvermögens für verschiedene Böden, Bodenbedeckungen und Pflanzen für die vier Bänder des Multi-Spectral-Scanners MSS; auf der Basis von [11]

sich Vegetation leicht von Sand, Wasser oder Gegenständen unterscheiden). Da der infrarote Anteil rot abgebildet wird, erscheint Vegetation auf einem Falschfarbenbild rot.

§ **330** Das Verhältnis von reflektierter Strahlung im sichtbaren Bereich zur reflektierten Strahlung im nahen Infrarot kann sogar verwendet werden, um verschiedene Vegetationsformen zu unterscheiden: so reflektiert ein Tannenwald im Infraroten nur etwas mehr als im roten Bereich, eine Birke bereits deutlich mehr und Gras reflektiert im roten Bereich nur sehr wenig Strahlung, im Infraroten dagegen sehr viel.

§ **331** Tabelle 3.2 gibt eine Übersicht über die Reflektivität verschiedener Böden und Pflanzen in vier verschiedenen Frequenzbereichen. Die Angabe der Frequenzbereiche erfolgt in Übereinstimmung mit den vier Spektralbändern des Multi-Spectral-Sensor MSS auf ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite - später auf LandSat 1 umgetauft). Da sich MSS so gut bewährt hat, haben auch viele moderne Instrumente diese Spektralbereiche.

§ **332** Abbildung 3.26 zeigt zwei weitere Beispiele für das spektrale Reflektionsvermögen gesunder und kranker Pflanzen über einen weiten Frequenzbereich. Im oberen Teil der Abbildung sind für drei Frequenzbereiche die Bestandteile der Pflanze angegeben, die die wesentlichen Anteile am reflektierten Licht beitragen. Während im sichtbaren Bereich die Pigmente und im langwelligen Bereich der Wassergehalt dominieren, ist im nahen IR die Zellstruktur maßgeblich. Die Hauptrolle spielt dabei das Mesophyll: Die Grenzschichten zwischen kleinen Luft- und Wasserbläschen in diesem Gewebe reflektieren das Infrarot besonders gut (vgl. Abschn. 3.7.2, insbesondere Abb. 3.85 und Abb. 3.86).

§ **333** Aus dem Infrarotbild lässt sich eine Abschätzung über Wachstums- und Reifegrad bzw. über die Pflanzengesundheit ableiten: gestresste Pflanzen reflektieren weniger Infrarot, da sich der Wassergehalt in ihnen verringert hat und die internen Blattstrukturen verändert sind, vgl. z.B. [209]. Angewendet wird dieses Verfahren in der Waldschadensforschung ebenso wie in der Ernteüberwachung. Auch lassen sich Informationen über die in einem bestimmten

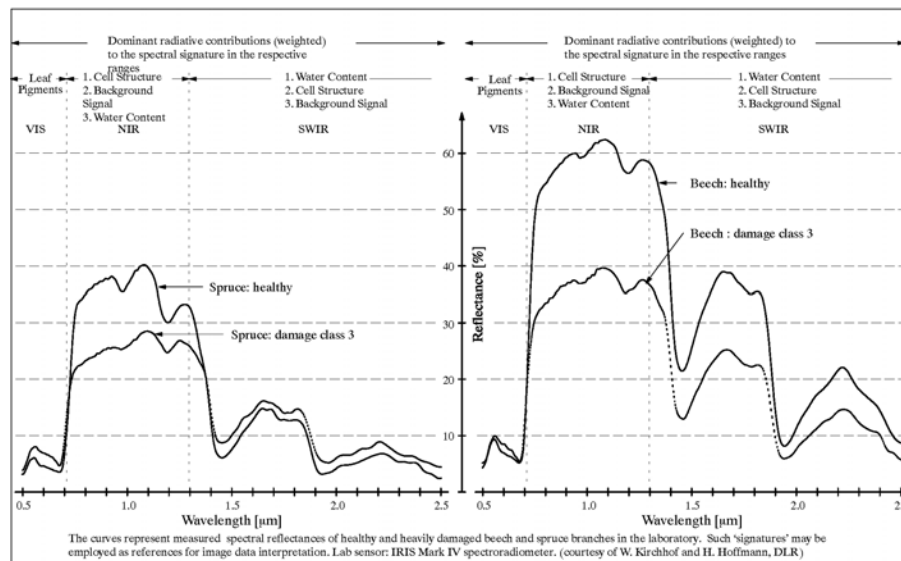


Abbildung 3.26: Spektrales Reflektionsvermögen für gesunde und kranke Fichte (*links*) und (Buche) über einen weiten Frequenzbereich [134]

Gebiet angebauten Pflanzen gewinnen. Diese Interpretationen sind jedoch relativ schwierig und erfordern hohe Genauigkeit. Satelliteninstrumente werden daher so kalibriert, dass Aufnahmen von großflächigen Monokulturen angefertigt werden und als Eichkurven dienen [133], vgl. Abschn. 3.7.2 und Abschn. 7.3.

§ 334 So attraktiv dieses Verfahren für die Erforschung der Biosphäre auch ist, es ist immer noch ein großer Aufwand in der Forschung und Modellierung notwendig, um die Erkennung verschiedener Vegetationsformen und des Zustandes dieser Pflanzen auf große Datensätze anzuwenden. Insbesondere hängen die Reflektionseigenschaften der Pflanzen von den Beleuchtungsbedingungen (Sonnenstand, Wolken, spektrale Verteilung der Einstrahlung), dem Beobachtungsort (Hanglage, meteorologische und klimatische Bedingungen, Aerosole, Wasserdampfgehalt der Atmosphäre) und natürlich den Eigenschaften der Pflanzen ab (Form der Pflanzen, Dichte und Verteilung der Pflanzen, Untergrund, Temperatur, tageszeitliche Variationen). Probleme entstehen insbesondere bei stark durchmischter Vegetation und in Laubwäldern z.B. durch Wind, da Blätter in Abhängigkeit von ihrer Stellung völlig unterschiedliche Reflektionseigenschaften haben können (Extremfall der Pappel mit relativ dunkler grüner Oberfläche und fast silberner Blattunterseite).

§ 335 Ein wichtiger Anstoß zur Entwicklung der Infrarotphotographie stammt natürlich mal wieder aus dem militärischen Bereich. Bei Luftaufnahmen im sichtbaren Bereich ist es schwierig, einen Panzer unter einem Tarnnetz von natürlicher Vegetation zu unterscheiden. Im nahen Infrarot dagegen gibt sich der Panzer dadurch zu erkennen, dass sein Tarnnetz nicht wie für Vegetation typisch, ein hohes Reflektionsvermögen besitzt – außer die Blätter des Tarnnetzes sind gerade frisch gepflückt.

§ 336 Abbildung 3.27 zeigt ein Beispiel für die Anwendung von Falschfarbenaufnahmen im Umweltmonitoring: die Abholzung des Amazonas. Rot sind die Waldflächen dargestellt, grünlich die Einschlagschneisen. Die linke Aufnahme stammt aus dem Jahre 1973 und zeigt im wesentlichen eine Schneise, wahrscheinlich einem Fluss oder einer anderen natürlichen Struktur folgend. Die rechte Aufnahme stammt aus dem Jahre 1987. Die Schneise von 1973 ist noch als Referenz zu identifizieren, die rechtwinklig abzweigenden Schneisen sind eindeutig menschlichen Ursprungs und markieren Abholzung und Zugang zu Einschlag- und Rodungsbereichen.

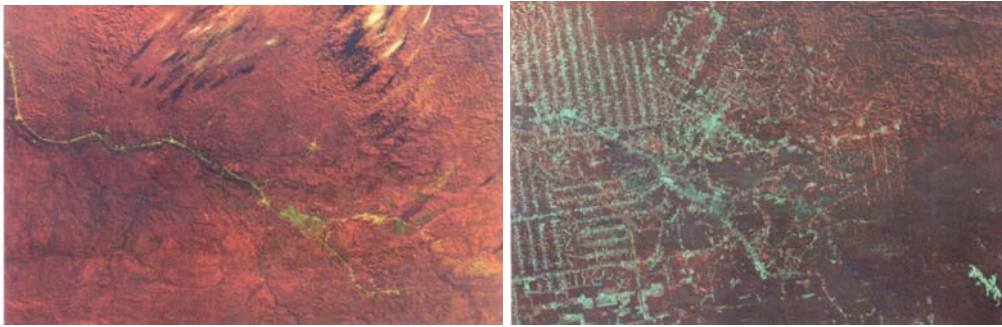


Abbildung 3.27: Abholzung des Amazonas: rot sind Waldflächen, grün in den Wald geschlagene Schneisen. Die linke Aufnahme stammt von 1973, die rechte von 1987 [33]

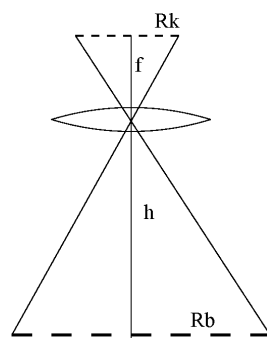


Abbildung 3.28: Zur Definition des Bodenaufklärungsvermögens

3.2.6 Charakterisierung eines photographischen Systems

§ 337 Die Eigenschaften eines Photoapparates beschreibt man durch die Brennweite und Lichtstärke des Objektivs, die Verschlussgeschwindigkeit und die Geschwindigkeit des Films. Für jede Aufnahmesituation kann man in Abhängigkeit von der Beleuchtung und dem Abstand zum Objektiv einige Eigenschaften der Aufnahme, wie Blickwinkel, Auflösungsvermögen und Kontrast, abschätzen. Im Prinzip könnte man die gleichen Kriterien auch bei einem Aufnahmesystem auf einem Satelliten verwenden. Da sich bei diesem aber der Abstand zum Objekt nicht ändert (Erderkundungssatelliten haben annähernd kreisförmige Bahnen) und die Lichtverhältnisse ebenfalls nahezu konstant sind (moderne Erderkundungssysteme überfliegen den Äquator immer zur gleichen Zeit), ist es einfacher, die Systeme nach der Qualität der von ihnen erzeugten Bilder zu beurteilen. Dazu werden als Kenngrößen verwendet: das räumliche Auflösungsvermögen (Bodenaufklärungsvermögen), das spektrale Auflösungsvermögen, das radiometrische Auflösungsvermögen, das thermische Auflösungsvermögen und das zeitliche Auflösungsvermögen.

Bodenaufklärungsvermögen

§ 338 Das Bodenaufklärungsvermögen bezeichnet die Fähigkeit eines Satelliteninstruments, einen auf der Erdoberfläche befindlichen Linientest aufzulösen (vgl. Abb. 3.28). Das Bodenaufklärungsvermögen R_b ist nach (3.1) gegeben zu

$$R_b = \frac{g}{f \cdot R_k} = \frac{h}{f \cdot R_k}, \quad (3.2)$$

worin R_k das Auflösungsvermögen des Systems Kamera-Film bezeichnet. Dieses setzt sich zusammen aus dem Auflösungsvermögen des Objektivs und dem der photographischen Emulsion. Letzteres wird in der Regel in Linienpaare/mm angegeben. Nach (3.2) wird das Bodenaufklärungsvermögen auch durch die Flughöhe des Satelliten bestimmt. Ein Instrument von einem frühen LandSat (900 km Flughöhe) würde daher auf einen militärischen Späher

Abbildung 3.29: Bodenauflösungsvermögen in Abhängigkeit von der Brennweite des Objektivs und dem Linienauflösungsvermögen des Systems Kamera-Film [28]

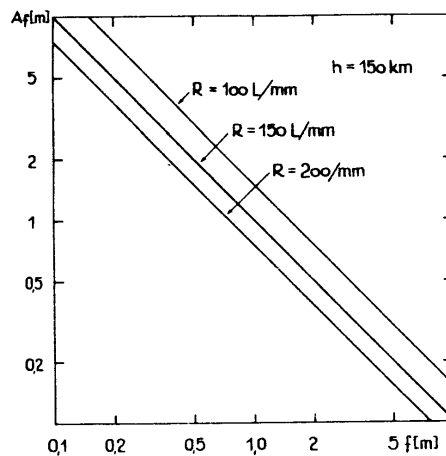
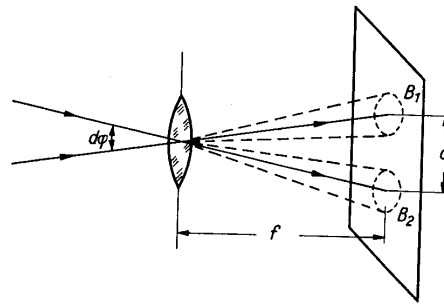


Abbildung 3.30: Winkelauflösungsvermögen [16]



(Flughöhe von 180 km) ein um einen Faktor 5 besseres Bodenauflösungsvermögen haben. Das Bodenauflösungsvermögen wird auch als IFOV (Instantaneous Field of View) bezeichnet. Dies entspricht bei Scannern der Kantenlänge der Fläche, die auf genau ein Pixel (Bildelement) des Bildes abgebildet wird.

§ 339 Das Bodenauflösungsvermögen ist in Abb. 3.29 für einen in einer Höhe von 150 km fliegenden Satelliten in Abhängigkeit vom Auflösungsvermögen des Systems Kamera-Film und von der Brennweite des Objektivs angegeben. Die Abschätzung für das Bodenauflösungsvermögen ist insofern optimistisch, als dass (a) die Flughöhe des Satelliten militärisch zu niedrig ist und (b) bei den sehr langen Brennweiten die Beugung das Auflösungsvermögen begrenzt.

§ 340 Diese Beugung bestimmt auch das Auflösungsvermögen des Objektivs, welches in das R_k in (3.2) eingeht. Das Winkelauflösungsvermögen θ des Objektivs ist:

$$\theta = \frac{a}{f} = \frac{\lambda}{D} \quad (3.3)$$

mit a als der in der Brennweite f aufgelösten Distanz, λ der Wellenlänge des Lichts und D dem Öffnungsdurchmesser des Objektivs. Dieser Abstand a auf der Filmebene kann nicht beliebig klein gemacht werden, da durch Beugung aus Punkten Beugungsscheibchen werden und der Mindestabstand zur Auflösung zweier benachbarter Punkte größer sein muss als der Durchmesser dieser Beugungsscheibchen (vgl. Abb. 3.30). λ ist vorgegeben, da wir im sichtbaren Bereich arbeiten. Dann bestimmt die Blendenöffnung D das Winkelauflösungsvermögen.

§ 341 Im Falle von Satelliten kann der Öffnungsdurchmesser D des Objektivs nicht beliebig groß gemacht werden, da einerseits die Baugröße durch den Satelliten eingeschränkt wird und andererseits die einfallende Lichtmenge reduziert werden muss. Bei einem mittleren λ von $5 \cdot 10^{-5}$ cm ergibt sich für eine Blendenöffnung von 1 cm (5 cm, 20 cm, 1 m) und eine Brennweite

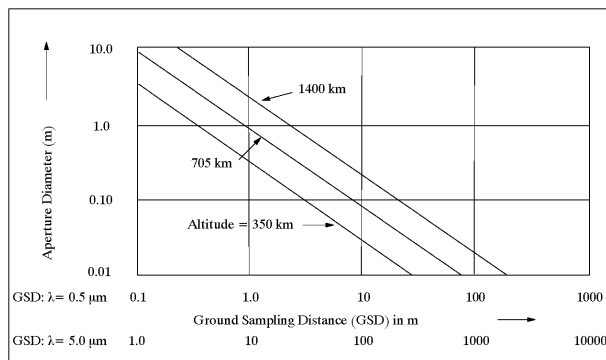


Abbildung 3.31: Einfluss des Winkelauflösungsvermögens [134], die Abszisse ist einmal für sichtbares Licht ($\lambda = 0,5 \mu\text{m}$), einmal für IR ($\lambda = 5 \mu\text{m}$) skaliert. Auf das geringere Auflösungsvermögen im thermischen IR werden wir noch häufiger zurück kommen

von 100 mm nach (3.3) in der Filmebene ein Durchmesser der Beugungsscheibchen von $5 \cdot 10^{-4} \text{cm}$ ($1 \cdot 10^{-4}$; $2,5 \cdot 10^{-5}$; $5 \cdot 10^{-6} \text{cm}$). Die letzten Werte liegen ungefähr in der Größe der Körnchen in einer photographischen Emulsion.

§ 342 Ist die Blendenöffnung sehr eng oder die Brennweite sehr groß, so kann der Durchmesser des Beugungsscheibchens den Durchmesser der Körnchen bei weitem übertreffen, d.h. das Objektiv und nicht die Körnigkeit des Films begrenzen das Auflösungsvermögen. Bei geringen Brennweiten oder großen Blendenöffnungen dagegen kann der Durchmesser des Beugungsscheibchens in der Größenordnung der Körnchengröße des Films oder noch darunter liegen, so dass in diesem Falle die Eigenschaften der photographischen Emulsion den größeren Einfluss auf das Bodenaufklärungsvermögen haben. Abbildung 3.31 gibt das durch das Winkelaufklärungsvermögen entstehende Bodenaufklärungsvermögen in Abhängigkeit von der Apertur und der Flughöhe des Satelliten.

§ 343 Objektive zur photographischen Aufklärung sollten also einerseits eine große Brennweite haben, um ein möglichst gutes Bodenaufklärungsvermögen zu erreichen. Andererseits ist die Brennweite aber auch begrenzt durch die Beugung und die große Länge und Masse von aus Linsen zusammengesetzten langbrennweitigen Objektiven. Lange Brennweiten werden daher durch die Verwendung von Spiegelobjektiven¹¹ realisiert, wobei die Baulänge bis auf 1/5 der Brennweite verringert werden kann [254]. Spiegelobjektive haben zusätzlich den Vorteil, dass sie weniger lichtstark sind. Daher muss ihr Öffnungsdurchmesser gegenüber dem eines Linsenobjektivs vergrößert werden, was die Einflüsse der Beugung verringert.

§ 344 Auch die photographische Emulsion trägt zum Auflösungsvermögen des Systems Kamera-Film bei. Verschiedene Faktoren definieren deren Auflösungsvermögen: zum einen das räumliche Auflösungsvermögen der Emulsion, d.h. die Größe der Silberkörnchen in einem Schwarz-Weiß-Film, zum anderen die Geschwindigkeit und der Kontrast des Filmes. Beide Größen sind, wenn auch mit anderen Bezeichnungen, auch für die elektronische Aufzeichnung relevant: die Größe des Pixels der CCD ebenso wie dessen Ansprechvermögen.

§ 345 Unter der Geschwindigkeit eines Films versteht man die Zeit, die der Film einer vorgegebenen Strahlung ausgesetzt sein muß, um eine ausreichende Bildung von latenten Bildern zu erreichen. Abbildung 3.32 zeigt die charakteristische Kurve, die den Zusammenhang zwischen der Belichtung und der Schwärzung des Films angibt: ist die Belichtung zu gering, so gibt es kein Signal. In einem linearen Bereich ist die Schwärzung der Belichtung proportional, für stärkere Belichtung dagegen kommt es zu einer Sättigung. Die charakteristischen Kurven hängen von der Geschwindigkeit des Filmes ab, sowohl die Lage der Kurven, d.h. der Einsatzpunkt eines Signals und der Beginn der Sättigung, als auch der Bereich, in dem die Kurve linear ansteigt und die Steigung in diesem Bereich. Ist die Belichtung so stark, dass die Sättigung erreicht ist, so verringert sich das Auflösungsvermögen der Emulsion, da

¹¹Das heißt eigentlich nur: Hubble Space Telescope, aber eben mit Blick in Richtung Erde. Das erklärt auch, warum die modernen Späher so groß sind.

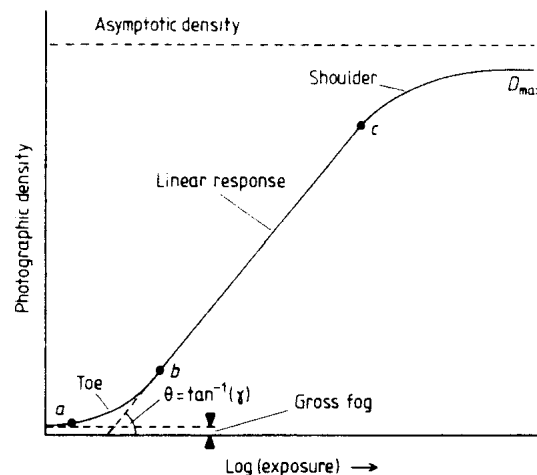


Abbildung 3.32: Charakteristische Kurve eines Films [129]

die einzelnen Körnchen auswaschen und zusammenwachsen. Außerdem werden Objekte unterschiedlicher Helligkeit, die aber alle hell genug sind, um eine Schwärzung innerhalb der Sättigung zu bewirken, nicht mehr voneinander getrennt. Während ersteres bei der CCD nicht ganz so relevant ist, tritt letzteres auch bei elektronischer Signalverarbeitung auf.

§ 346 Der Kontrast beschreibt die Reaktion des Filmes auf unterschiedliche Belichtungen. Er kann ebenfalls mit Hilfe der charakteristischen Kurve verstanden werden. Wenn die Belichtung außerhalb des linearen Bereiches liegt, so bewirken signifikante Unterschiede in der Belichtung kaum Unterschiede in der Schwärzung, d.h. für den Kontrast ist es wichtig, dass ein Film geeigneter Geschwindigkeit gewählt wird. Je nach Steigung der charakteristischen Kurve im linearen Bereich ist der Film mehr oder weniger gegen leichte Unterschiede in der Helligkeit der betrachteten Objekte empfindlich. Andererseits reagiert ein empfindlicher Film sehr empfindlich gegen zu kurze oder lange Belichtungszeiten, d.h. der Spielraum bei der Belichtung wird klein.

§ 347 Das räumliche Auflösungsvermögen der Emulsion wird durch die bereits oben erwähnte Korngröße eines Films gegeben, diese liegt zwischen 1 und 10 μm bzw. 40 Linien/mm bis 100 Linien/mm [198], bei feineren Filmen bis 200 Linien/mm [28]. Dieses räumliche Auflösungsvermögen ist mit der Geschwindigkeit des Films gekoppelt: Sind die Körner groß, so ist die Auflösungsvermögen klein und es werden nur wenige Photonen benötigt, um eine Schwärzung zu bewirken, der Film ist also schnell. Je feiner die Körner sind, umso langsamer wird der Film, wobei aber das räumliche Auflösungsvermögen besser wird. Zum Vergleich: für ein Standardobjektiv (Brennweite 105 mm, Öffnung 5 cm) beträgt das durch die Beugung bedingte maximale Auflösungsvermögen 300 Linien/mm, d.h. bei einem derartigen Objektiv begrenzt der Film die Auflösung [198].

§ 348 Beispiele für das Bodenaufklärungsvermögen von photographischen Satellitensysteme gab es lange Zeit nur aus dem zivilen Bereich, für den militärischen Bereich gibt es eine Vielzahl von Gerüchten und Vermutungen – einiges hat sich heute durch die Deklassifizierung militärischer Aufnahmen überprüfen lassen (vgl. Abschn. 3.2.1). Sehr konventionelle, von Hand bediente Kameras wurden z.B. auf SkyLab verwendet, einem zeitweise bemannten Observatorium in einer Höhe von 435 km. Verwendet wurde eine Multispektralkamera aus 6 Einzelkameras mit unterschiedlichen Filmen und Filtern für Wellenlängen zwischen 0.4 und 0.9 μm . Mit einer Objektivbrennweite von 152 mm und einer Kantlänge der Filme von 70 mm ergab sich ein Blickfeld von 163 x 163 km und eine Bodenaufklärung zwischen 60 und 145 m [209]. Eine weitere Kamera (Earth Terrain Camera) mit einer Brennweite von 457 mm und einem Blickfeld von 109 x 109 km wurde mit verschiedenen Filmen (Farbe, Schwarzweiß, IR - Schwarzweiß) betrieben und erreichte je nach Film ein Bodenaufklärungsvermögen von

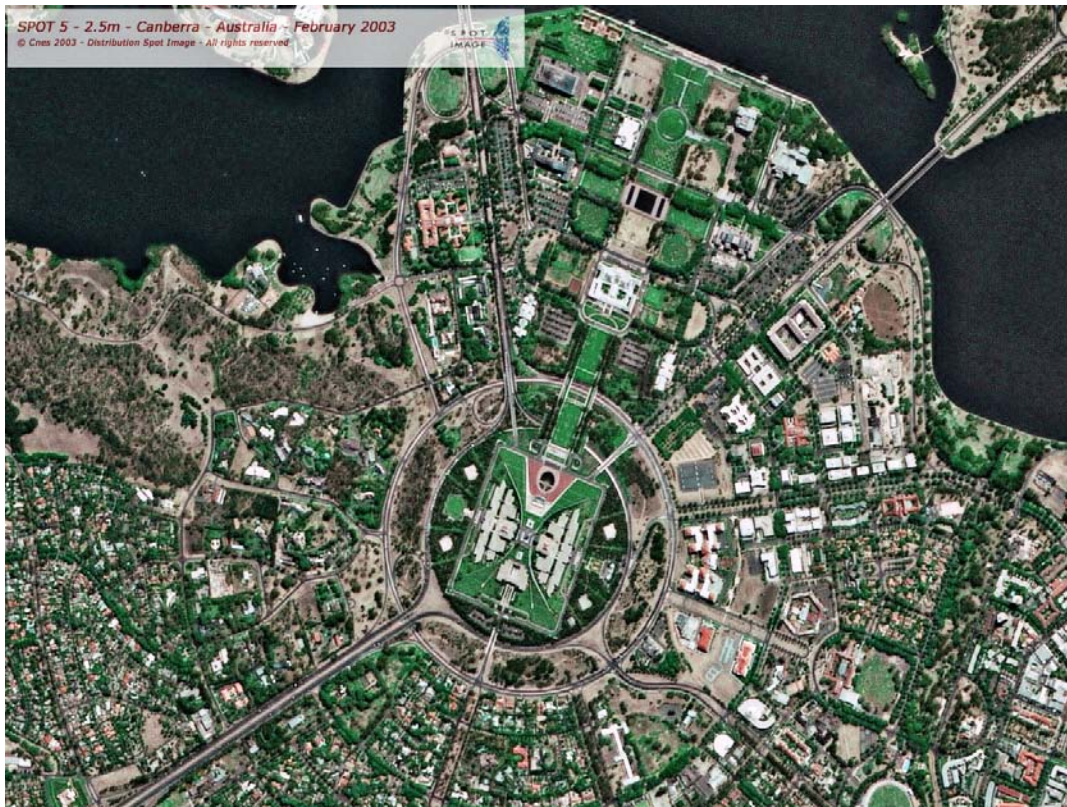


Abbildung 3.33: SPOT Aufnahme von Canberra [679]

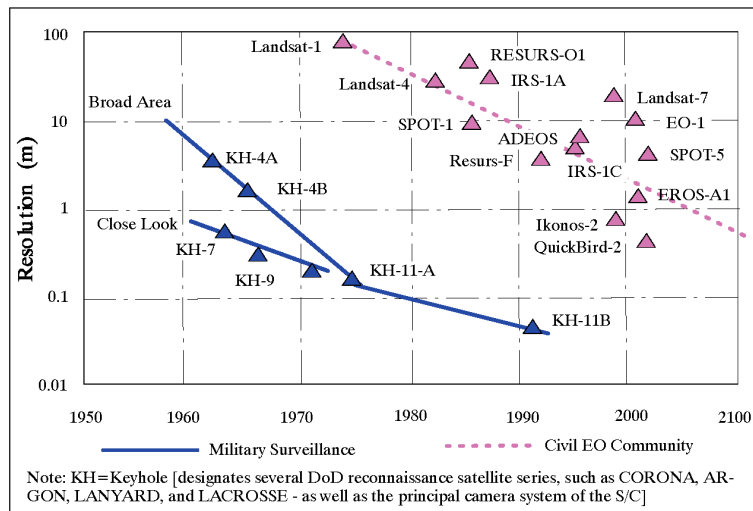
15 m bis 30 m. Mit den Scannern auf den etwas älteren Erdbeobachtungssatelliten (z.B. SPOT und LandSat) lassen sich aus einer Höhe von 900 km Bodenaufklärungsvermögen zwischen 10 m und 80 m erreichen. Kommerzielle Systeme wie Ikonos oder SPOT 5 (als Beispiel der Blick auf Canberra in Abb. 3.33) liefern Bodenaufklärungsvermögen von ca. 1 m, wobei das hohe Bodenaufklärungsvermögen im panchromatischen Modus erreicht wird, die Farbbilder meist ein um einen Faktor 3 bis 4 geringeres Auflösungsvermögen haben; QuickBird schafft auf Grund seiner geringeren Flughöhe ein Bodenaufklärungsvermögen von 0.65 m (siehe auch Abb. 1.11). Die auf CDs oder von Google Earth vertriebenen Ikonos-Bilder sind häufig Kombinationen aus panchromatischen und mehrfarbigen Bildern: erstere werden verwendet, um die letzteren in ihrer Auflösung zu verbessern.

§ 349 Die neuesten Entwicklungen (in der Regel wohl Scanner und nicht unbedingt photographische Emulsionen) erlauben deutlich bessere Auflösungsvermögen, vgl. Abb. 3.34. Im militärischen Bereich scheint man damit unter die 10 cm Grenze zu kommen; das Lesen der Schlagzeile der Bildzeitung aus dem Orbit wird damit vielleicht bald möglich werden – ob es sinnvoll ist, ist eine andere Frage.

§ 350 Tabelle 3.3 fasst noch einmal die bereits in Abb. 3.34 dargestellten Auflösungsvermögen der wichtigsten zivilen Satelliteninstrumente im sichtbaren Bereich zusammen. Außerdem gibt die Tabelle die Informationen über die Breite des Bildausschnitts (Swath Width) sowie die Datenrate: mit zunehmendem Bodenaufklärungsvermögen wird einerseits das Blickfeld immer enger, andererseits die Datenrate immer höher.

Zwischenrechnung 11 Wieviele Orbits benötigt Ikonos-2, um die Erdoberfläche vollständig (oder genauer bis zu der seiner Inklination entsprechenden geographischen Breite) abzuscannen. Wie lange dauert dies bei 15 Orbits pro Tag?

Abbildung 3.34: Mit verschiedenen Systemen erreichbares Bodenaufklärungsvermögen [134]



Mission/Launch Date	Sensor	Spatial Resolution (best band)	Swath width	Data Rate
Landsat-1 / Jul. 23, 1972	MSS	80 m	185 km	15 Mbit/s
Landsat-4 / Jul. 16, 1982	TM	30 m	185 km	85 Mbit/s
Resurs-O1-1 / Nov. 3, 1985	2 MSU-E	45 m x 33 m	80 km (total)	
SPOT-1 / Feb. 22, 1986	2 HRV	10 m	117 km (total)	50 Mbit/s
IRS-1A / Mar. 17, 1988	2 LISS-II,	36 m	2 x 74 km	2 x 10.4 Mbit/s
Resurs-F / (series)	KFA-1000	6-8 m	70 km	Film
IRS-1C / Dec. 28, 1995	PAN	6 m	70 km	125 Mbit/s
ADEOS / Aug. 17, 1996	AVNIR	8 m	80 km	60 Mbit/s
Landsat-7 / Apr. 15, 1999	ETM +	13 m x 15 m	185 km	150 Mbit/s
EO-1 / Nov. 21, 2000	ALI	10 m	185 km	300 Mbit/s
Ikonos-2 / Sept. 24, 1999	OSA	1 m PAN 4 m MS	11-13 km	320 Mbit/s
QuickBird-1 / Nov. 20, 2000 (launch failure)	BGIS 2000	1 m PAN 4 m MS	27 km	320 Mbit/s
NEMO / 2003	COIS, PIC	30 m, 5 m	30 km	150 Mbit/s

Tabelle 3.3: Bodenaufklärungsvermögen einiger wichtiger Imager zur Erdbeobachtung sowie die damit verbundene Datenrate [134]

Verständnisfrage 23 Viele Erdfernerkundungssatelliten fliegen in sonnensynchronen Orbits. Können die Satelliten aus einem sonnensynchronen Orbit Bilder von den Polen liefern? Oder welche Eigenschaften müssen die Orbits und/oder Instrumente haben?

Spektrales Auflösungsvermögen

§ 351 Das spektrale Auflösungsvermögen bezeichnet die Fähigkeit des Systems, Wellenlängenbereiche zu trennen. Bei einer Multispektralkamera z.B. werden drei bis sechs relativ breite Wellenlängenbereiche getrennt. Die spektrale Auflösung ist für die ersten, im wesentlichen auf Kartographie und militärische Aufklärung ausgelegten Systeme, von untergeordneter, aber, wie die frühe Entwicklung der Multispektralkameras zeigt, nicht zu vernachlässigender Bedeutung gewesen. Heutige moderne Systeme versuchen, auch die spektrale Auflösung zu verfeinern. Beim High-Resolution Imaging Spectrometer HIRIS (siehe auch § 553) z.B. wird eine spektrale Auflösung des Wellenlängenbereiches 0.4 bis 2.5 μm (sichtbares Licht bis mittleres Infrarot) in 200 Kanäle angestrebt [10].

§ 352 Die Motivation für ein sehr gutes spektrales Auflösungsvermögen ist im Prinzip die gleiche, wie die zur Verwendung des nahen Infrarot: verschiedene Materialien haben eine wellenlängenabhängige Reflektivität (vgl. Abb. 3.25 und Tabelle 3.2). Objekte, die in einer Farb- oder Schwarzweißaufnahme sehr ähnlich aussehen, können bei stark verfeinerter Spektral-

analyse aber deutlich unterschieden werden. Dadurch lassen sich unter anderem verschiedene Pflanzenspezies besser unterscheiden und es lassen sich sogar deren physiologische Parameter wie Alter und Feuchtigkeitsgehalt bestimmen (vgl. einige der Artikel in [60]). Letztendlich möchte man mit derartigen Instrumenten Spektroskopie in der Form betreiben, wie man es vom Labor gewohnt ist.

Thermisches Auflösungsvermögen

§ 353 Das thermische Auflösungsvermögen ist für die Infrarotsensoren von Bedeutung, die im Bereich des thermalen Infrarot arbeiten, d.h. die von einem Körper emittierte Wärmestrahlung betrachten. Hierbei handelt es sich eigentlich nur um eine andere Formulierung für ein spektrales Auflösungsvermögen, siehe Abschn. 3.3.1.

Radiometrisches Auflösungsvermögen

§ 354 Das radiometrische Auflösungsvermögen bezeichnet die Fähigkeit, Helligkeitswerte zu unterscheiden. Bei schlechter radiometrischer Auflösung verringert sich auch das Bodenauflösungsvermögen, insbesondere wenn die beobachteten Objekte nicht sehr kontrastreich sind, vgl. Abb. 7.4. Kontrastanreicherung bei der Weiterverarbeitung kann zwar einen Teil dieser Ungenauigkeiten wieder ausgleichen, ist aber zur vollständigen Kompensation nicht ausreichend, vgl. Abschn. 7.2.1. Man kann sich die Bedeutung des Kontrastes für das Auflösungsvermögen einfach veranschaulichen, Sabins [209] gibt Testtafeln, die den Einfluss des Kontrastes auf das Auflösungsvermögen des Auges demonstrieren. Das radiometrische Auflösungsvermögen (bei Detektoren statt Filmen) wird in Bits angegeben, gängige Werte sind 7 Bit (128 Grauwerte, LandSat MSS) oder 8 Bit (256 Grauwerte, LandSat TM oder SPOT-HRV; eigentlich alle modernen Instrumente sowie die Standard CCD in der Digitalkamera arbeiten mit 8 Bit pro Spektralkanal).

Zeitliches Auflösungsvermögen

§ 355 Das zeitliche Auflösungsvermögen bezeichnet die Wiederholfrequenz, d.h. die Zeit die zwischen zwei aufeinanderfolgenden Aufnahmen eines bestimmten Gebietes vergeht. Auf Grund der großen Eigengeschwindigkeit von Satelliten ist das zeitliche Auflösungsvermögen, außer bei geostationären Satelliten, nicht durch die Kamera-Verschlusszeiten oder vorgegebene Wiederholzeiten gegeben, sondern durch die durch den Satellitenorbit bestimmte Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Flügen über ein bestimmtes Gebiet.

§ 356 Oder für moderne Instrumente formuliert, die auch mal einen Blick zur Seite riskieren: die minimale Zeit die vergeht, bis ein bestimmtes Aufnahmegebiet wieder in die Reichweite eines Sensors kommt – und sei es durch Schwenken eines Spiegels wie bei SPOT, durch den Aufnahmefächer wie bei MISR [319, 465, 466] auf Terra [617] oder im Extremfall (der militärischen Aufklärung) durch Bahnmanöver. Irgendwozu müssen ja die 450 kg Hydrazin gut sein, die die offizielle Begründung für den Abschuss eines US-Spähers gegeben haben.¹²

Querverbindung 2 Angenommen, die 450 kg Hydrazin dienen wirklich der Überraschung des Gegners. Schätzen Sie ab, wie viele Manöver in welcher Größenordnung man mit dieser Treibstoffmenge ausführen könnte.

§ 357 Der Blick zur Seite wird auf Grund des immer besser werdenden Auflösungsvermögens und der damit verbundenen geringeren Breite des Bildes quer zur Bodenspur (Swath Width, siehe auch Tab. 3.3) immer wichtiger: während LandSat nach knapp drei Wochen wieder vorbei kam, benötigt EnviSat bereits fünf Wochen (bei noch recht großer Swath Width). Für Späher wie QuickBird dagegen ist die Swath Width nur noch ca. 1/6 derer von LandSat – entsprechend mehr Bodenspuren werden benötigt, bis auch am Äquator alles abgescannt ist.

¹²Anekdotisch wird ja behauptet, die US-Späher müssten manövrieren können, um auch Überraschungsfüge machen zu können – meist verraten sich aber selbst die ganz geheimen [717].

Verschlechterung des Auflösungsvermögens

§ 358 Bisher haben wir das (Boden-)Auflösungsvermögen einer Satellitenkamera unter optimalen Bedingungen betrachtet. Eine Verschlechterung des Auflösungsvermögens entsteht einerseits durch die Eigenschaften des Instruments, andererseits durch Streuung und Absorption in der Atmosphäre. Letzteres dürfte auch das Auflösungsvermögen selbst militärischer Späher allmählich begrenzen, Möglicherweise ist dieser Bereich instrumentell bereits ziemlich ausgereizt; stattdessen könnten die Herausforderungen in einer aufwendigen Nachbearbeitung am Boden liegen.

§ 359 Die instrumentell bedingten Verschlechterungen entstehen durch den verwendeten Film (Filmempfindlichkeit, Kontrastempfindlichkeit), das Objektiv (Kontrastverschlechterung, Öffnungswinkel, Abbildungsfehler können das Auflösungsvermögen zu den Rändern hin um bis zu einen Faktor 2 verringern [133]) und die Bewegung des Satelliten. Letztere führt zu einer Bildverschiebung d in der Filmebene, gegeben durch

$$d[\mu\text{m}] = 1000 \cdot \delta \cdot v \left[\frac{\text{km}}{\text{s}} \right] \cdot \frac{f}{g} \left[\frac{\text{mm}}{\text{km}} \right] \cdot t[\text{s}] \quad (3.4)$$

mit t als der Belichtungszeit, δ als dem Faktor der Vorwärtskompensation und v als der Subsatellitengeschwindigkeit [28, 254]. Die Vorwärtsbewegung führt zu einer Verschmierung der Bilddetails in Bewegungsrichtung.

Zwischenrechnung 12 Schätzen Sie die Bildverschiebung für typische Instrumente ab.

§ 360 Die zweite Einflussgröße lässt sich quantitativ weniger genau beschreiben, da die Ausprägung dieser Einflüsse durch die große atmosphärische Variabilität bestimmt ist. Die Streuung (Dunst, zur genauen Beschreibungen vgl. z.B. [143]) in der Atmosphäre bewirkt eine Kontrastverschlechterung. Als Gegenmaßnahme werden Anti-Dunstfilter verwendet, die das blaue atmosphärische Streulicht unterdrücken. Bei Multispektralkameras werden die Wellenlängenbereiche bevorzugt, in denen die Streuung geringer ist (vgl. auch Abb. 3.25) bzw. verwenden diese zu einer nachträglichen Dunstkorrektur, vgl. Abschn. 7.1.6 und Abb. 3.47.

§ 361 Zusätzlich bewirken Dichteschwankungen in der Atmosphäre zufällige Winkelverschiebungen der betrachteten Objekte (Szintillation oder Pulsation). Die damit verbundene Kontrastverschlechterung ist um so größer, je näher die Kamera den Turbulenzonen ist und lässt sich (zumindest z.Z.) auf Grund der Relativbewegung zwischen Aufnahmesystem und Objekt nicht wie bei einem astronomischen Teleskop durch Despeckeln korrigieren.

3.2.7 Elektronische Aufzeichnung statt photographischer Emulsion

§ 362 Die bisher diskutierten photographischen Systeme sind gleichsam der Urahn der Satelliteninstrumente zur Erderkundung. Die Technik einer Kamera ist relativ einfach und gut verstanden, allerdings hat die Verwendung eines Films als Aufzeichnungsmedium verschiedene Nachteile: (a) die Lebensdauer des Systems ist durch den mitgeführten Filmvorrat begrenzt und (b) der belichtete Film muss entweder zur Erde zurückgeführt werden oder an Bord des Satelliten entwickelt, elektronisch abgetastet und dann als Digitalsignal zum Boden gesandt werden. Photographische Kameras werden daher heutzutage im wesentlichen nur noch auf bemannten Missionen (ISS, Space Shuttle) verwendet.

§ 363 Das Problem der Filmrückführung wurde bei militärischen Aufklärungssatelliten aufwendig gelöst, vgl. Abb. 6.1. Diese fliegen meist in niedrigen Orbits, so dass ihre Lebensdauer kurz ist. Die FSU hat nach jeweils 1 bis 2 Wochen Flugzeit ihre Satelliten mittels eines 'geordneten Absturzes' über eigenem Gebiet zu Boden gebracht und so die Filmkapseln geborgen. Um eine kontinuierliche Überdeckung zu erreichen, benötigte man entsprechend viele Satelliten. Amerikanische Satelliten dagegen packten die belichteten Filme in Kapseln, die abgeworfen werden. Die Kapsel sendet während ihres Falls Funksignale aus, so dass ihre Flugbahn von Schiffen und Flugzeugen aus verfolgt werden kann. In einer Höhe von 16 km

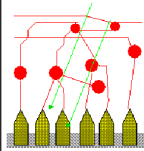
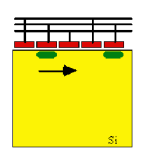
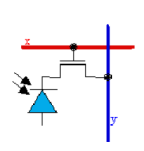
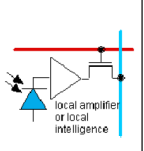
				
Eye	CCD	MOS diode array	MOS active pixel	Film
Photo-chemical detection, transfer by neurons	Multiplexing of charge packets by loss-less transfer	Multiplexing by switches on photodiode node	Multiplexing of the local amplifier output	Photo-chemical detection and development
Rod and cone signal levels are "processed" by ganglion cells	One charge sense amplifier at the end of the CCD register	One charge sense amplifier on the output bus	(Charge sense) amplifier in every pixel	Pure local change in optical absorption

Abbildung 3.35: Auge vs. Silizium: Eigenschaften verschiedener optischer Detektorsysteme [134]

öffnet die Kapsel einen Fallschirm und wird dann entweder von einem Flugzeug aufgefangen oder beim Absturz ins Meer von einem Schiff geborgen (vgl. z.B. [257, 739]).

Auge und Film vs. Elektronik

§ 364 Auge, Film und elektronische Medien nutzen zwar alle die Energie des Photons zu dessen Nachweis aus. Im Detail unterscheiden sich jedoch die Sensoren und die nachfolgende Informationsverarbeitung. Abbildung 3.35 gibt einen Überblick über die Messprinzipien, Tabelle 3.4 gibt die zugehörigen Zahlen.

§ 365 Insbesondere aus Tab. 3.4 wird deutlich, dass alle Systeme – abgesehen vom oben diskutierten Problem der Filmrückführung beim echten Film – ihre Vor- und Nachteile haben: es gibt kein optimales System. So ist z.B. das radiometrische Auflösungsvermögen des Auges nahezu ungeschlagen – insbesondere, da es im dunklen Bereich auf eine lineare, im helleren dagegen auf eine logarithmische Skala abbildet. Auch sein Auflösungsvermögen ist besser als das des Siliziums und wird nur vom konventionellen Film übertroffen. Als Nachteile hat es aber auch eine große Integrationszeit und keine Möglichkeit zur Bestimmung absoluter Helligkeitswerte.

§ 366 Es ist jedoch unerheblich, ob wir den Vor- oder Nachteilen von Auge oder konventionellem Film nachtrauern – praktikabel ist für die moderne Fernerkundung nur die Verwendung von elektronischen Aufzeichnungsmedien.

Evolution der elektronischen Aufzeichnung: Strukturen

§ 367 Der direkte Nachfolger der Filmkamera ist die Videokamera – bereits das in Abb. 3.12 gezeigte Bild ist von einer Videokamera aufgenommen. Klassische Videokameras sind jedoch eher ein Seitenzweig in der Erdfernerkundung; sie wurden allerdings noch relativ lange bei Missionen zu anderen Planeten eingesetzt.

§ 368 Der Versuch, den Film durch ein elektronisches Aufzeichnungsmedium zu ersetzen, erfolgte in mehreren Stufen, siehe Abb. 3.36. Der Schirm einer Videokamera hat sich als nicht ausreichend empfindlich erwiesen. Empfindlicher dagegen ist eine Photozelle. Diese liefert jedoch keine Ortsinformation sondern nur ein einziges Pixel.

§ 369 Das einzelne Photoelement ist für Imaging jedoch keine Einschränkung – das hat bereits 1959 Explorer 6 (siehe auch § 297) demonstriert. Auch der Elektronenstrahl in einer konventionellen Bildröhre liefert nur einen einzelnen Bildpunkt; das Bild entsteht dadurch, das der Elektronenstrahl die zweidimensionale Fläche horizontal und vertikal abscannt. Bei einem Satelliteninstrument ist die eine Scanrichtung durch die Flugrichtung gegeben, die

Criterion	Eye	CCD	CMOS APS	Film
Spectral response	400-700 nm peaked at 555 nm	400-1000 nm smooth	400-1000 nm	300-700 nm
Peak quantum efficiency	<20%	>50%	>50%	
Dynamic range	10 ⁶ logarithmic 10 ² linear	10 ⁴ linear	2x10 ³ linear, also 10 ⁶ logarithmic	10 ³ - 10 ⁴ non-linear
Dark limit	0.001 lux 10 ⁻⁶ W/m ²	typ: 0.1 lux <0.0001 possible	typ: 1 lux 0.001 possible	virtually zero
Noise photons	10	10	100	100
Integration time (room temperature)	0.3 s	40 ms typical 5 min possible	40 ms typical 10 s possible	virtually unlimited
Maximum frame rate	ca. 15 Hz	10 kHz	>>10 kHz	1 snapshot only
AIC (Automatic Illumina- tion Control) delay	1 minute	1 s typical	<1 s	
Resolution (packing density)				
Number of pixels	120 M	800 k typical 60 M record	800 k typical	>10 ⁸ grains, with 100-1000 gr./pixel
Pixel pitch	2-3 µm	5-10 µm	5-10 µm	10-20 µm effect.
Focal plane size	3 cm	1 mm - 11 cm	1 mm - 2 cm	limited by film size
Operating conditions				
Radiation hardness	1 mrad	10 krad	10 krad (Mrad is assumed)	
Operating temperature	36°C	-200 to +200°C	0 K to +200°C	0 K to 100°C
Power dissipation	<1 mW	500 mW typically	50 mW typically	none
On-board image processing				
Cosmetic quality	perfect	very good	not so good	almost perfect
Color	ideal	poor (only RGB)	poor	poor or print quality
Absolute photometry	not possible	easy	easy	possible
Focal plane processing	extensive	none	typically none	none
Access method	data driven (focus of attention)	serial only	serial, random access	optical only
Data path	5 M nerves	8-10 bits	8 bits	none

Tabelle 3.4: Auge vs. Silizium: Eigenschaften verschiedener optischer Detektorsysteme [134]

andere durch einen sich senkrecht dazu bewegenden Spiegel.¹³ Auf diese Weise ergibt sich ein panchromatischer Scanner – für eine Multispektralkamera würde man pro Spektralkanal einen derartigen Scanner benötigen und eine sehr gute Synchronisation zwischen diesen. Oder einfacher: man spaltet den gesamten Strahl auf verschiedene Detektoren auf (siehe § 371).

§ 370 Die Weiterentwicklung dieses auf einem einelementigen Detektor basierenden Scanners ist die Kehrbesentechnik. Hier steht eine Zeile von photosensitiven Detektoren zur Verfügung, die einem Kehrbesen gleich über die Bodenspur des Satelliten gezogen wird. Das Scannen senkrecht zur Flugrichtung entfällt. Auch dieser Scanner arbeitet im panchromatischen Modus. Der Bau einer Multispektralkamera aus mehreren Scannern ist jedoch einfach möglich, da die Synchronisation der Spiegel entfällt; man benötigt lediglich für jeden Wellenlängenbereich eine eigene Detektorzeile.

§ 371 Für einen Multispektralscanner lässt sich eine Detektorzeile auch anders verwenden: die einzelnen Elemente der Detektorzeile werden nicht zur Untersuchung unterschiedlicher Bildpunkte verwendet sondern zur Aufzeichnung unterschiedlicher Frequenzbereiche. Dazu wird ein Scanner wie beim einelementigen Detektor verwendet, das Signal wird spektral zerlegt und auf die Detektorzeile abgebildet. Dieses Verfahren wird heute in den gängigen Spektrometern verwendet.

§ 372 Mit Hilfe eines zweidimensionalen CCD-Arrays lässt sich der senkrecht zur Bewegungsrichtung scannende Spiegel wieder einsparen: die eine Dimension des Arrays bildet jeweils die Detektorzeile eines Kehrbesens, die andere Dimension untersucht die unterschiedlichen Frequenzbereiche. Im panchromatischen Modus entfällt sogar das Scannen entlang der

¹³Explorer 6 hat 1959 diese Technologie als erster (ziviler) Späher eingesetzt. Statt eines Spiegels rotiert der gesamte Satellit in Cartwheel Technologie – ein für Wettersatelliten durchaus akzeptables Vorgehen.

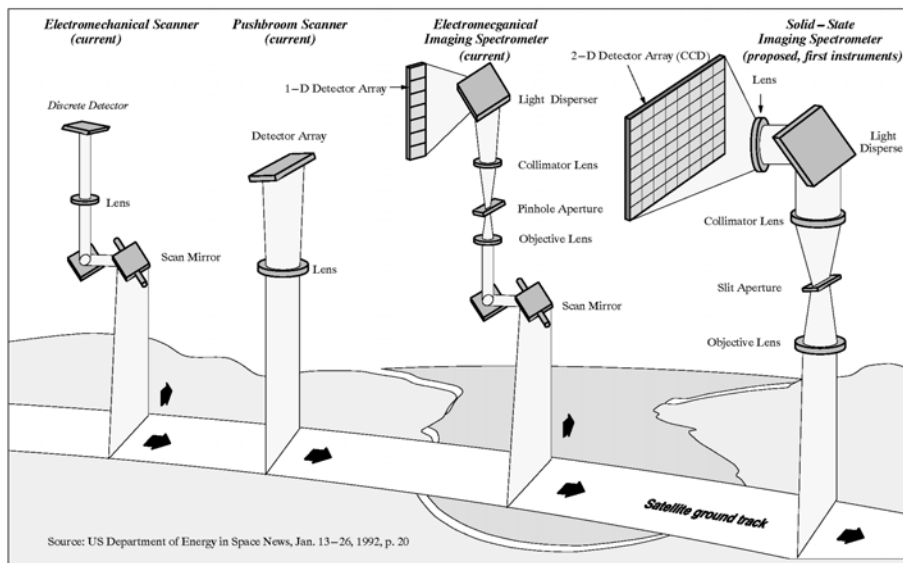


Abbildung 3.36: Evolution elektronischer bildgebender Verfahren [134]

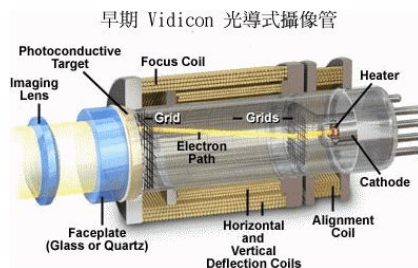


Abbildung 3.37: Prinzip des Vidicons [475]

Flugbahn – dann haben wir die ganz normale Digitalkamera und sind zu den Anfängen der Photographie zurück gekehrt.

Verständnisfrage 24 Abgesehen vom Verzicht auf das bewegliche Element: hat der Verzicht auf den Spiegel unter Verwendung einer CCD-Dimension weitere Vor- oder etwas Nachteile?

Videokameras

§ 373 Dem konventionellen photographischen Verfahren am ähnlichsten ist jedoch das RBV (Return Beam Vidicon), die Videokamera. Vorteil dieser Systeme gegenüber konventionellen photographischen Systemen ist ihre hohe Quantenausbeute, d.h. sie arbeiten auch unter ungünstigen Beleuchtungsverhältnissen. Ihr Hauptnachteil sind ein schlechtes räumliches und radiometrisches Auflösungsvermögen.

§ 374 Der wichtigste Bestandteil einer Videokamera ist ein Vidicon, siehe Abb. 3.37. Dabei handelt es sich um einen photosensitiven Schirm, dessen elektrische Leitfähigkeit je nach einfallender Lichtintensität variiert. Das Blickfeld wird wie bei einer konventionellen Kamera über ein Objektiv auf diesen Schirm projiziert. Dieser hält das Bild für eine gewisse Zeit fest, während derer der Schirm elektronisch abgetastet wird (zum Prinzip vgl. z.B. [129]).

§ 375 Eine verbesserte Version des Vidicons (SEC-Vidicon) durch Sekundärelektronenvervielfachung erreicht eine erhöhte Quantenausbeute und ein etwas besseres radiometrisches Auflösungsvermögen. Dabei wird das zu scannende Bild nicht direkt von den Photonen produziert, sondern die Photonen fallen auf einen Schirm, aus dem sie Elektronen auslösen. Diese

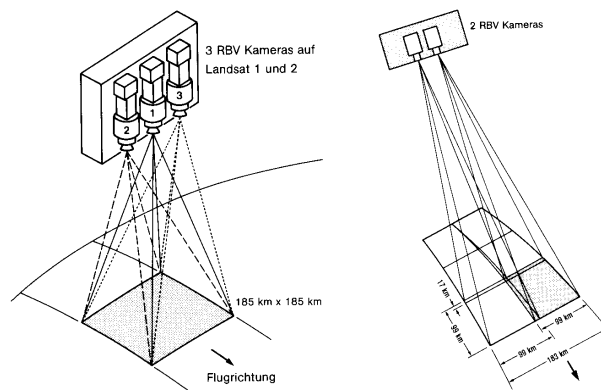


Abbildung 3.38: LandSat Videokameras [154]

Elektronen werden in der Röhre auf einen zweiten Schirm hin beschleunigt, aus dem sie Sekundärelektronen herausschlagen. Diese werden von einer positiven Elektrode abgezogen und erzeugen dort ein Potentialmuster, das das ursprünglich einfallende Muster reproduziert und als Ausgangssignal abgetastet wird. Ein Photoemitter am Eintrittsfenster kann so gewählt werden, dass das Vidicon für bestimmte Wellenlängenbereiche empfindlich ist. Damit besteht die Möglichkeit zu Multispektralaufnahmen. Letztere kann man auch durch den Vorsatz geeigneter Filter vor ein einfaches Vidicon erzeugen.

Verständnisfrage 25 Erhält man mehr Information oder kann man diese nur besser auslesen?

§ 376 Während ein normaler Fernsehschirm, der ja nach der Umkehrung dieses Prinzips arbeitet, normalerweise in 625 Zeilen abgetastet wird, werden in den in Satelliten installierten Vidicons rund 4500 Rasterzeilen abgetastet. Vidicons waren eine Standardausstattung der ersten zivilen Erderkundungssatelliten (LandSat 1-3), sind aber heutzutage vollständig von Scannern verdrängt.

§ 377 Auf LandSat 1 [534] und 2 [535] wurden drei parallele RBV Kameras eingesetzt (siehe Abb. 3.38 links, [565, 566]) für Multispektralaufnahmen in den Wellenlängenbereichen $0.475 - 0.575 \mu\text{m}$ (Blaugrün), $0.58 - 0.68 \mu\text{m}$ (Gelbrot) und $0.68 - 0.73 \mu\text{m}$ (Rot und Infrarot). Diese Kameras konnten alle 25 Sekunden ein Gebiet von $185 \times 185 \text{ km}$ aufnehmen. Mit der Zeilenzahl des Vidicons ergibt sich daraus eine Auflösung von 80 m [43, 154]. Die Bilder der einzelnen Kameras entsprechen jeweils Aufnahmen, wie sie ein Schwarz-Weiß-Film liefern würde, farbige Aufnahmen werden daraus durch Überlagerung erzeugt.

§ 378 Auf LandSat 3 [536] wurden nur zwei RBV-Kameras eingesetzt, die parallel geschaltet waren (siehe Abb. 3.38 rechts, [567]). Beide Kameras hatten nur einen Breitbandkanal von $0.51 - 0.75 \mu\text{m}$ (Gelb bis nahes Infrarot), d.h. auf die spektrale Auflösung wurde verzichtet. Dafür hatten sie aber ungefähr doppelt so große Brennweiten wie die LandSat 1 und 2 Instrumente. Dadurch ergibt sich ein nur halb so großes Blickfeld ($99 \times 99 \text{ km}$), so dass zwei Kameras notwendig sind, um das gleiche Gesamtblickfeld auszuleuchten. Die größere Brennweite führte zu einem räumlichen Auflösungsvermögen von 30 m [43]. Die LandSat-RBV-Bilder wurden verwendet, um die gleichzeitig aufgenommenen MSS-Bilder in ihrer räumlichen Auflösung zu verbessern. Das Prinzip der Überlagerung multispektraler Bilder mit geringerer und panchromatischer Bilder mit höherer Auflösung zur Verbesserung des Bodenaufklärungsvermögens der Multispektralaufnahmen hat sich bis in die heutigen modernen Satelliten erhalten; insbesondere die kommerziellen Späher wie SPOT und Ikonos bedienen sich dieses Verfahrens.

§ 379 Die RBV-Kameras haben sich nur begrenzt bewährt. Ihr Hauptproblem ist die geringe radiometrische Auflösung, so dass weniger als die Hälfte der LandSat RBV Aufnahmen eine gute Qualität aufwies ([43] und Zitate darin). Für die Missionen zu anderen Planeten wurden RBV-Kameras für die Beobachtungen im optischen und nahen IR eingesetzt, z.B. auf Viking

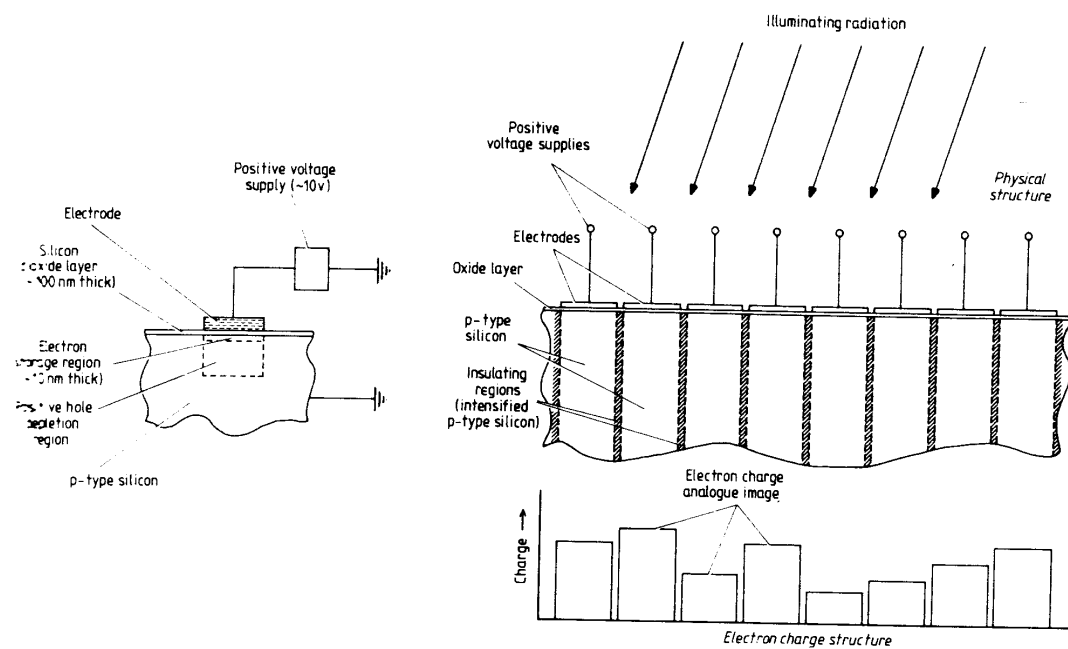


Abbildung 3.39: Aufbau eines einzelnen CCD und eine Zeile von CCDs [129]

[501, 602] und Mariner [405, 541, 444] (Erforschung des Mars), auf Voyager (äußere Planeten und ihre Monde [476]) und Mariner 10 (Venus [50]) – neuere Missionen verwenden ebenfalls Scanner.

CCDs: Charged Coupled Devices

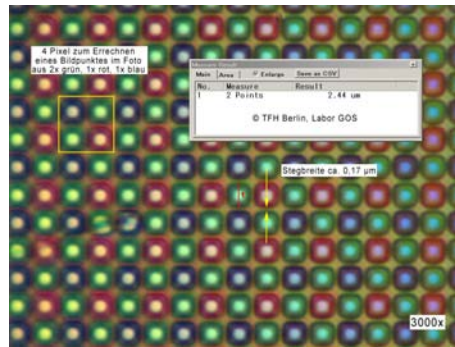
§ 380 Bei einer Videokamera erfolgt eine elektronische Aufzeichnung auf einen Schirm, d.h. abgesehen von der elektronischen Aufzeichnung ist das Verfahren dem der konventionellen Photographie sehr ähnlich. Bei den Charged Coupled Devices (CCDs) wird der Film ersetzt durch einen einzelnen, eine Reihe oder eine Fläche lichtempfindlicher Sensoren, wie in Abb. 3.36 angedeutet.

§ 381 Die Wirkungsweise des CCD beruht – wie alle Nachweisverfahren für Photonen, inkl. des konventionellen Films – auf dem photoelektrischen Effekt: auf Materie, in diesem Fall einen Halbleiter fallendes Licht, erzeugt ein Elektron-Loch Paar. Diese Elektronen werden in Potentialsenken gefangen, die aus vielen kleinen Elektroden bestehen. Dort sammeln sich die Elektronen bis ihre Anzahl durch ‘charge coupling’ der Sensorelektrode zu einer Ausleselektrode übergeben wird.

§ 382 Der Aufbau eines einzelnen CCD-Elements ist im linken Teil von Abb. 3.39 gezeigt. Die Elektrode ist gegenüber dem Halbleiter durch eine dünne Siliziumoxidschicht getrennt (Verwandschaft mit dem Metalloxid-Silizium-Transistor MOS). Die Elektrode wird auf einer geringen positiven Spannung gehalten, die gerade gross genug ist, um die positiven Löcher in das p-dotierte Silizium zu treiben und die Elektronen in eine dünne Schicht unterhalb der Elektrode zu ziehen. Die von der einfallenden Strahlung in dieser Verarmungsschicht erzeugten Elektronen-Lochpaare werden genauso getrennt, die von der Strahlung erzeugten Elektronen sammeln sich ebenfalls unterhalb der Elektrode. In diesem Speicherbereich hat sich dann eine Elektronenladung geformt, die eine Funktion der Intensität der einfallenden Strahlung ist. Ein CCD verhält sich daher wie ein strahlungsgetriebener Kondensator.

§ 383 Ordnet man viele dieser Elektroden auf einem einzigen Siliziumchip an und isoliert die Verarmungsregionen gegeneinander, so entwickelt jede von ihnen eine Ladung, die der auf sie

Abbildung 3.40: Pixel (weißes Quadrat) und photosensitive Elemente einer CCD [687]



fallenden Strahlung proportional ist. Ein Beleuchtungsmuster wird also in ein räumlich digitalisiertes Ladungsmuster verwandelt. Für die technische Lösung des Problems des Auslesens dieses Ladungsmusters sei z.B. auf [129] verwiesen.

§ 384 Die Verwendung von CCDs in der Erdfernerkundung hat, entsprechend der technischen Entwicklung, wie bereits im Zusammenhang mit Abb. 3.36 diskutiert, drei Stufen durchlaufen:

1. die Verwendung von Einzel-CCDs (bzw. kleiner Zeilen mit einer CCD pro Spektralkanal) beim Scanner, der nur jeweils ein Pixel zur Zeit aufnimmt und durch eine Kombination aus Satellitenbewegung und Bewegung eines Spiegels senkrecht zur Satellitenbahn scannt (oder in bewährter Cartwheel Manier);
2. die Verwendung einer Zeile von CCDs in der Kehrbesentechnik bei der die Bewegung des Satelliten zum Scannen ausgenutzt wird;
3. und in den neuesten Satelliten (insbesondere kommerziellen wie Diamant [371]) die Verwendung von CCD-Arrays, d.h. instrumentell kehrt die Erdfernerkundung jetzt zu ihren Ursprüngen zurück, der Aufzeichnung der Information auf einem zwei-dimensionalen Medium – allerdings muss die zweite Dimension nicht zwingend zur Aufzeichnung räumlicher Information genutzt werden sondern kann auch, wie in Abb. 3.36 angedeutet, die spektrale Information liefern.

§ 385 Allen oben beschriebenen Verfahren ist gemein, dass die Dimension des Detektors (maximal 2) geringer ist als die Zahl der aufzuzeichnenden Dimensionen (in der Regel zwei räumliche Dimensionen sowie die spektrale). Die Verwendung mehrerer Scanner zum Abdecken der spektralen Information ist aufgrund der nahezu unmöglichen Koordination der Instrumente nicht empfehlenswert (das war bei den konventionellen Multispektralkameras wie MFK-6 bereits eine nicht zu unterschätzende Herausforderung). Eine räumliche Dimension lässt sich allerdings durch die Bahnbewegung des Satelliten abtasten (Kehrbesentechnik), die räumliche Dimension senkrecht dazu erfordert entweder eine Dimension des CCD oder den scannenden Spiegel – ungeliebt, da als bewegliches Teil Fehler anfällig und im Orbit nicht zu reparieren.

§ 386 Die CCD einer konventionellen Digitalkamera hat in der Erdfernerkundung vergleichbare Nachteile wie der Farbfilm. Zum einen ist das spektrale Auflösungsvermögen mit drei Kanälen/Farbschichten nur begrenzt (und insbesondere nicht gezielt gewählt), zum anderen verringert die Anordnung der Pixel für die einzelnen Farbkanäle, siehe Abb. 3.40, das Auflösungsvermögen: vier photosensitive Elemente bilden letztendlich ein Pixel.

3.2.8 Scanner in Kehrbesentechnik

§ 387 Bei der Kehrbesentechnik (zweites Teilbild von links in Abb. 3.36) wird die räumliche Dimension senkrecht zur Bodenspur auf ein eindimensionales Array abgebildet, die zweite Dimension wird durch die Eigenbewegung des Satelliten gescannt.

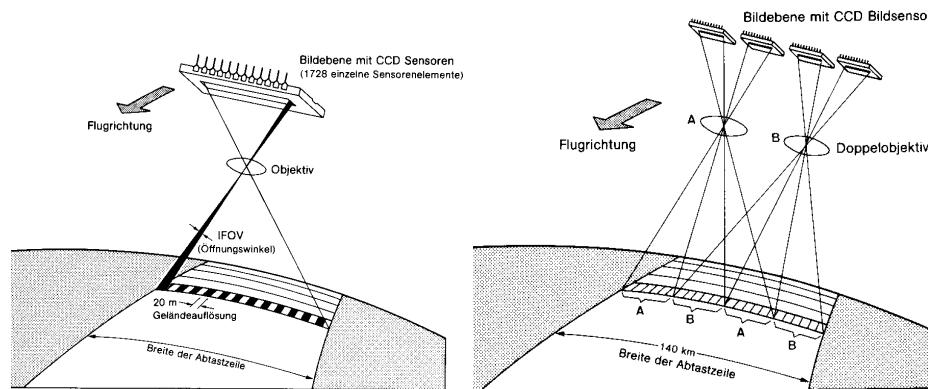


Abbildung 3.41: Optoelektronischer Abtaster (links) und Verbesserung des Auflösungsvermögens durch die MOMS-Doppeloptik [154]

Kehrbesentechnik 1D MOMS

§ 388 Der prinzipielle Aufbau eines optoelektronischen Abtasters gemäß Kehrbesentechnik ist im linken Teil von Abb. 3.41 am Beispiel des MOMS [300, 551] gezeigt. Eine CCD-Sensorzeile in einem Instrument dieser Generation kann aus bis zu 2000 CCDs bestehen [154]. Diese Sensorzeile wird wie ein Kehrbesen über das abzutastende Gelände geschoben (push broom scanning, Kehrbesenabtasten). Das gesamte System besteht also aus einem Objektiv und einer Zeile von CCDs, die den Film in einer konventionellen Kamera ersetzt. Das Verfahren entspricht dem einer Streifenkamera. Mechanische Bauteile (z.B. Objektivverschluss oder scannender Spiegel) sind nicht notwendig, wodurch sich eine hohe Zuverlässigkeit ergibt. Die Instrumente arbeiten einfach und energiesparend, so dass sie für Anwendungen auf Satelliten optimal sind.

§ 389 Die Begrenzung des Bodenaufklärungsvermögens ist durch die Zahl der einzelnen Sensorelemente in einer Bildzeile im Vergleich zur Streifenbreite der Bodenspur¹⁴ gegeben. Um eine höhere Auflösung zu erreichen, werden mehrere Bildzeilen miteinander gekoppelt. Im rechten Teil der Abbildung ist dazu der Modulare Optoelektronische MultispektralScanner (MOMS) dargestellt, bei dem durch eine Doppeloptik aus zwei genau aufeinander abgestimmten Objektiven der abzutastende Streifen auf insgesamt vier CCD-Zeilen gegeben wird. Damit ist die Auflösung um einen Faktor 4 verbessert, da bei gleicher Breite der Abtastzeile am Boden eine vierfache Anzahl von Bildpunkten erzeugt wird. Im Multispektralbetrieb (ein Modul misst im sichtbaren, eins im infraroten Spektralbereich) ergibt sich bei Aufnahmen vom Space Shuttle aus eine Bodenaufklärung von 20 m.

§ 390 MOMS ist eine mechanisch recht aufwendige Konstruktion, da in jeder der beiden Kameras (Dimension Spektralbereich) eine Vierergruppe von CCD-Zeilen (eine räumliche Dimension) exakt auf die entsprechende Zielzeile am Boden ausgerichtet werden muss.

Kehrbesentechnik 2D HRV auf SPOT

§ 391 CCDs in Kehrbesentechnik werden auch auf dem in den 1990ern wahrscheinlich effektivsten Universal-System zur Erdfernerkundung SPOT [676, 681] eingesetzt. Abbildung 3.42 zeigt das Funktionsprinzip der High Resolution Visible (HRV) Imager [526, 527, 681] auf den SPOT Satelliten der ersten Generation (SPOT 1–3 [578, 579, 580]). Auf SPOT 4 [581] steht ein zusätzlicher Kanal im nahen IR, ebenfalls mit einer Bodenaufklärung von 20 m, zur Verfügung. Der jüngste Vertreter, SPOT 5, hat ein besseres Bodenaufklärungsvermögen mit 10 m im Multispektralbereich und 2,5 m im panchromatischen Modus.

¹⁴Letztere ist durch den Blickwinkel des Instruments bestimmt (und damit meist auch die Zahl der Orbits, die ein Satellit benötigt, um die Erdoberfläche einmal vollständig abzuscannen).

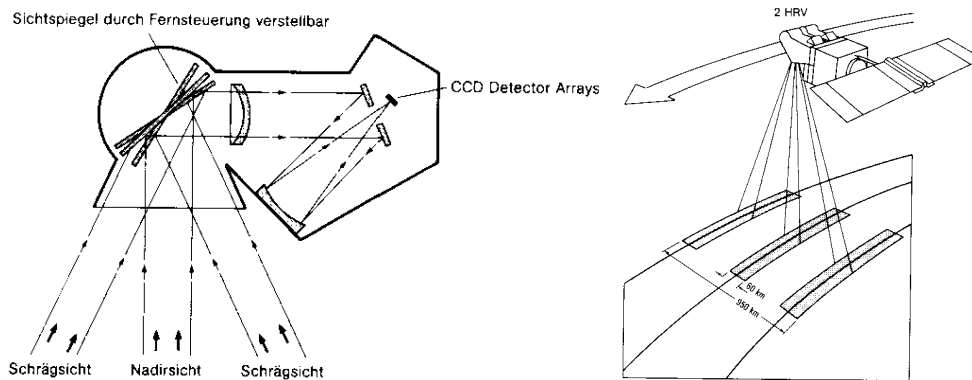


Abbildung 3.42: Prinzip der High Resolution Visible (HRV) Kamera auf SPOT und Veränderung des Aufnahmegebiets durch Verstellung des Spiegels [154]

Tabelle 3.5: Charakteristika des SPOT High Resolution Visible HRV Instruments; die Spektralkanäle entsprechen ungefähr denen eines IR Farbfilms

	Multispektral	Panchrom.
Spektralbänder:		
– grün	0.50 – 0.59 μm	0.51 – 0.73 μm
– rot	0.61 – 0.68 μm	–
– nahes IR	0.79 – 0.89 μm	–
Blickfeld	4.13°	4.13°
Breite Bodenspur	60 km	60 km
Bodenaufslg.	20 m	10 m
Detektoren/Band	3000	6000

§ 392 Das photosensitive Element besteht aus einer Reihe von ca. 6000 CCDs [154]. Bei einem Blickfeld von 60 km Breite ergibt sich eine Auflösung von 10 m (panchromatischer Modus; im multispektralen Modus beträgt die Auflösung 20 m). Da zwei Instrumente parallel geschaltet sind, ergibt sich ein Gesamtblickfeld von 117 km (3 km Überlappung).

§ 393 Die Optik besteht aus einem Spiegelteleskop und einem davor angebrachten Drehspiegel. Dieser Drehspiegel steht während einer Aufnahme fest (er fungiert nicht als scannendes Element!), kann jedoch so bewegt werden, dass die Kamera etwas zur Seite blickt (rechter Teil in Abb. 3.42). Dadurch können innerhalb eines 950 km breiten Streifens beliebige 60 km breite Streifen herausgegriffen werden. Dadurch kann dann ein Gebiet beobachtet werden, ohne dass es direkt überflogen wird. Angewendet wird dies z.B. bei schnell veränderlichen Phänomenen (z.B. die Beobachtung der Ölbrände während des ersten Golfkrieges) oder um Aufnahmen, die bei wolkenbedecktem Himmel erfolgten, bereits kurze Zeit später wiederholen zu können und nicht erst nach 26 Tagen (Wiederholfrequenz durch die Bahn).

§ 394 Durch das Schwenken des Spiegels können auch echte stereoskopische Aufnahmen eines Gebiets erstellt werden. Wie früher in der Luftbildaufnahme gibt es damit Abbildungen in Steilsicht und Schrägsicht. Daraus lassen sich 3D Rekonstruktionen erstellen; Abb. 3.43 zeigt als Beispiel Mont Valier gesehen von SPOT 5. Mit der Stereo-Aufnahme kommt automatisch die dritte räumliche Information, die Höhe, ins Bild – Radar ist hierfür also verzichtbar.

§ 395 Das HRV-Instrument auf SPOT kann in zwei Modi betrieben werden, als Multispektralkamera (drei Spektralbereiche, vgl. Tabelle 3.5) oder im panchromatischen Mode. In letzterem erreicht das Instrument ein Bodenaufklärungsvermögen von 10 m – bei SPOT 5 sind es 2.5 m. Die Multispektralanalyse erfolgt durch eine aus verschiedenen Filtern bestehende Scheibe vor dem CCD, bei der immer das Filter des gewünschten Frequenzbereiches in den Strahlengang gedreht wird.



Abbildung 3.43: Die Stereo-Aufnahmen von SPOT 5 erlauben auch die 3D Rekonstruktion eines Gebiets, hier des Mont Valier [680]

§ **396** Trotz der guten räumlichen Auflösung von SPOT sollte man berücksichtigen, dass der Thematic Mapper von LandSat mit seiner besseren spektralen Auflösung und dem größeren überdeckten Spektralbereich für viele Anwendungen Vorteile hat (z.B. in geologischen Fragestellungen). Die Suche nach Mineralien- oder Ölvorkommen erfordert keine so gute räumliche Auflösung, dafür ist dort die spektrale Auflösung, insbesondere der Vergleich von Band 5 und 7 des TM von entscheidender Bedeutung. Ein Mixen der TM und SPOT Aufnahmen zur Verbesserung des Auflösungsvermögens, so wie früher mit den MSS und RBV Aufnahmen von LandSat und heute mit den panchromatischen und mehrfarbigen Aufnahmen von Ikonos und seinen hochauflösenden Kollegen gemacht, ist nicht möglich, da die Aufnahmen weder zeitlich noch räumlich synchronisiert werden können.

§ **397** Einen zum HRV-Instrument nahezu identischen Aufbau hat die Multispektralkamera auf Giotto [358, 356], die 1986 die ersten Nahaufnahmen eines Kometen (Halley) zur Erde zurücksandte [208] und damit das Bild eines Kometen als einer riesigen, durch das All fliegenden Kartoffel schuf.

3.2.9 Scanner: Spiegel statt Objektiv

§ **398** Bisher haben wir uns von der konventionellen photographischen Aufzeichnung nur durch Verwendung eines anderen aufzeichnenden Mediums entfernt, jedoch die Abbildung mit Hilfe eines Linsenobjektivs beibehalten. In diesem Abschnitt werden wir nun Systeme betrachten, in denen das klassische Objektiv durch einen oszillierenden Spiegel ersetzt wurde – ein Abbildungssystem, z.B. im Sinne eines Spiegelteleskops, benötigt man natürlich weiterhin. Im Extremfall kann man die Sensorzeile einsparen und stattdessen, wie in Abb. 3.36 angedeutet, mit einem einzelnen photosensitiven Element auskommen. Oder die Sensorzeile nicht afür die räumliche sondern für die spektrale Information verwenden.

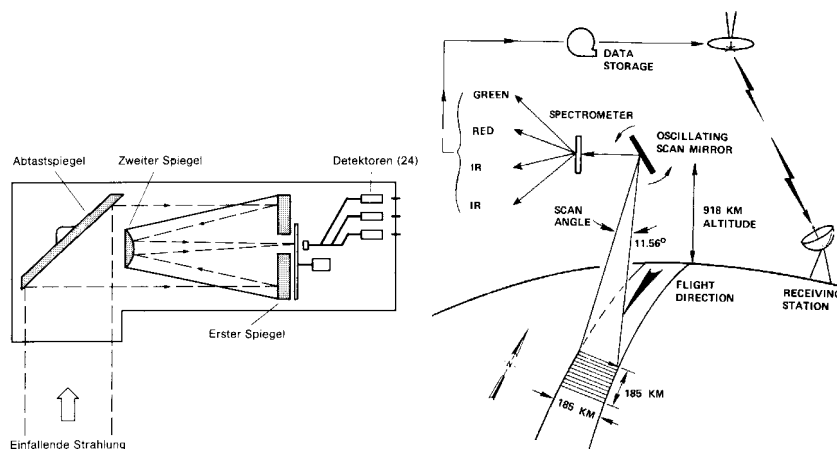


Abbildung 3.44: Prinzip des Multispektralscanners MSS auf LandSat (links, [154]) und Blickfeld und Arbeitsweise für die Scanner auf LandSat 1-3 (rechts [209]). LandSat 4 und 5 fliegen in einer Höhe von 705 km und haben statt der 11.56° einen Scanwinkel von 14.9° um die gleich Swath Width zu erreichen

LandSat MSS

§ 399 Bekannteste (und wahrscheinlich in ihrer Anwendung auch legendäre) Beispiele sind der Multispektralscanner (MSS [552, 553, 554, 555, 556], für Details und Datenprodukte siehe [712]), der auf allen LandSat-Flügen bis einschließlich LandSat 5 [534, 535, 536, 537, 538] verwendet wird, und der Thematic Mapper (TM [593, 594], für Details und Datenprodukte siehe [713]), der auf den LandSat-Satelliten der zweiten Generation (LandSat 4 und 5) als Ersatz für die RBV-Kamera verwendet wird. Der TM unterscheidet sich vom MSS durch ein besseres räumliches und radiometrisches Auflösungsvermögen, arbeitet aber nach dem gleichen Prinzip. Er wurde für den aktuellen LandSat 7 zum Enhanced Thematic Mapper+ (ETM+ [516], siehe § 411 und [714]) weiter entwickelt. Da der MSS ein wichtiges Monitoring Instrument ist und einen bis in das Jahr 1972 zurück reichenden Datensatz erzeugt hat, ist mit LandSat 5 immer noch ein alter LandSat aktiv – außerdem wird über eine Folgemission LDCM nachgedacht [424, 708, 709].

§ 400 Abbildung 3.44 zeigt im linken Teil die Arbeitsweise eines Multispektralabtasters. Das Funktionsprinzip dieses Scanners beruht auf einem oszillierenden Spiegel, der Geländestreifen senkrecht zur Flugrichtung abtastet. Dieser Spiegel projiziert die einfallende Strahlung über eine Spiegeloptik auf ein Spektrometer, das in den vier Wellenlängenbereichen Grün ($0.5 - 0.6 \mu\text{m}$), Rot ($0.6 - 0.7 \mu\text{m}$) und nahes Infrarot ($0.7 - 0.8 \mu\text{m}$ und $0.8 - 1.1 \mu\text{m}$) die Intensität der Strahlung registriert. Diese Wellenlängenbereiche sind idealisiert; wie bei jedem Messinstrument sind sie nicht scharf getrennt, sondern haben Ansprechfunktion, die einen Schwerpunkt in der Intervallmitte haben und zu den Rändern auch in die Messbereiche benachbarter Bänder reichen (siehe Abb. 3.45 links).

§ 401 Die bei einer Spiegeldrehung vom MSS abgetasteten Bereiche sind 476 m breit. Dies ergibt sich aus der fürs Abtasten benötigten Zeit und der Geschwindigkeit des Satelliten über Grund. Damit die räumliche Auflösung nicht auf diese 476 m beschränkt ist, werden 6 Detektoren pro Wellenlängenband betrieben, so dass jeder einzelne abgetastete Streifen 79 m breit ist. Die von den Detektoren gemessenen Intensitätswerte werden in 64 Kanäle eingeteilt, d.h. die photometrische Auflösung ist auf 6 Bit begrenzt.

Zwischenrechnung 13 Schätzen Sie ab, wie schnell sich der Spiegel drehen muss – damit erhalten Sie gleichzeitig die Belichtungszeit.

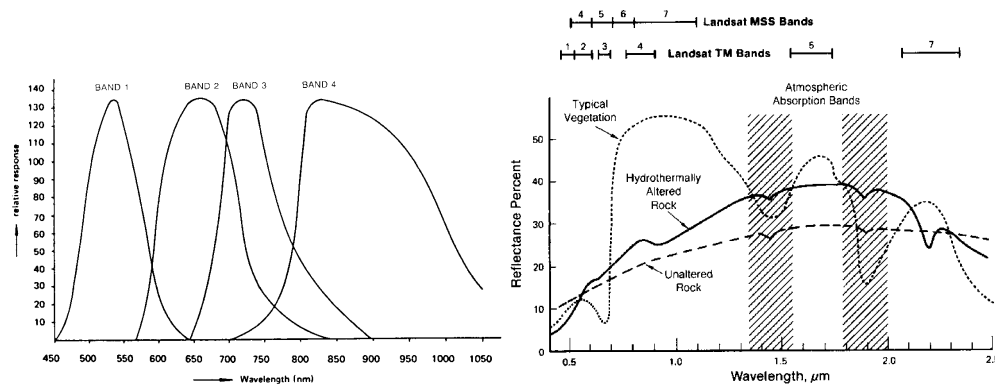


Abbildung 3.45: Links: LandSat TM Wellenlängenbereiche [41]; rechts: Spektralbereiche für die beiden LandSatinstrumente TM und MSS, zum Vergleich ist das spektrale Reflektionsvermögen für Vegetation und Gestein gezeigt [209]

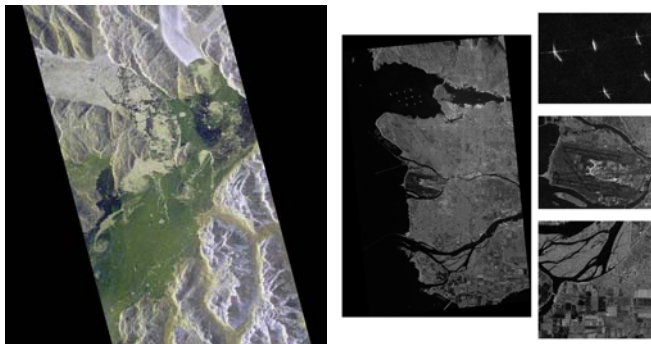


Abbildung 3.46: Die Rohdaten eines Scanners liefern ein unendlich langes Band entlang der Bodenspur; links Grönland, rechts Vancouver [284]

§ 402 Diese 476 m breiten Streifen werden kontinuierlich abgescannt, d.h. man könnte im Prinzip ein einziges großes Bild der Erdoberfläche entlang der Satellitenspur erstellen. Um später mit den Aufnahmen der zumindest noch bei den frühen LandSats mit fliegenden RBV-Kameras vergleichen zu können (Kombination zur Verbesserung des Bodenaufklärungsvermögens), wird der Datenstrom nach jeweils 185 km unterbrochen. Das entspricht den 25 Sekunden, die die RBV-Kamera zum Abtasten eines Bildes benötigt. Obwohl die Auflösung des MSS geringer ist als die der RBV-Kamera, hat sich das System gegenüber der RBV Kamera bewährt, insbesondere dadurch, dass es unempfindlicher gegen Belichtungsprobleme ist und eine bessere spektrale Auflösung bietet.

§ 403 Dieses Rohformat ist in Abb. 3.46 mit Hilfe der ersten Aufnahmen von RadarSat-2 illustriert. Im linken Teilbild erkennt man, dass die Informationen einem unendlich langen Streifen entlang der Bodenspur entsprechen, wobei die Swath-Width die Breite des Streifens gibt, die Inklination des Satelliten die Neigung dieses Streifens gegen einen Längengrad. Erst das zurecht schneiden liefert die gewöhnlichen rechteckigen Formate – für größere Ausschnitte müssen erst entsprechend viele Streifen gesammelt werden.

LandSat TM

§ 404 Auf den LandSat-Satelliten der zweiten Generation (LandSat 4 und 5 [537, 538]) ist die RBV-Kamera durch den Thematic Mapper TM [593, 594] ersetzt. Der TM basiert auf dem gleichen Prinzip wie der MSS, ist diesem gegenüber aber in den folgenden Punkten verbessert:

- das räumliche Auflösungsvermögen beträgt 30 m (79 m beim MSS): die gesamte Zeilenbreite ist durch die Satellitenbewegung zu 480 m gegeben, jedoch erfolgt, außer im thermischen

1	blau	0.45 – 0.52 μm	maximales Eindringen in Wasser (Bathymetrie) Unterscheidung Boden und Vegetation; Unterscheidung Laub- und Nadelhölzer
2	grün	0.52 – 0.60 μm	Pflanzenaktivität
3	rot	0.63 – 0.69 μm	entspricht Chlorophyll-Absorption; Unterscheidung Pflanzenarten
4	nahes IR	0.76 – 0.90 μm	Biomassen-Gehalt, Küstenlinien
5	nahes IR	1.55 – 1.75 μm	Feuchtegehalt Boden und Pflanzen, Unterscheidung Vegetationstypen; durchdringt dünne Wolken
6	therm. IR	10.4 – 12.5 μm	Nachtaufnahmen thermisches Mapping, Bodenfeuchte
7	nahes IR	2.08 – 2.35 μm	entspricht Absorptionsband von Hydroxylionen in Mineralien. Verhältnis Bänder 5/7 für hydrothermisch veränderten Fels und Mineralienvorkommen

Tabelle 3.6: Spektralbänder des Thematic Mapper und ihre Beziehung zur Interpretation der Bilder bzw. zu konkreten Fragestellungen an einzelne Kanäle

Infrarot, eine Aufteilung auf 16 Detektoren (6 im MSS).

- der TM hat sieben Spektralbänder (4 beim MSS, für die Spektralbereiche siehe Abb. 3.45 rechts). Der Spektralbereich des TM erstreckt sich dabei über einen breiteren Bereich vom Blauen bis ins thermische Infrarot (Kanal 6 von 10.4 – 12.5 μm ist in Abb. 3.45 nicht 6 gezeigt).
- das radiometrische Auflösungsvermögen ist besser (auf 256 Kanäle erweitert, also bereits die üblichen 8 bit).

§ 405 Die Bezeichnung Thematic Mapper wird verständlich, wenn man sich die Auswahl der Wellenlängenbereiche genauer ansieht. Diese sind nicht mehr einfach so gewählt, dass die Überlagerung dieser Bilder wieder ein Gesamtbild in korrekten Farben erzeugt, sondern so, dass jeder Spektralbereich für sich Auskünfte geben kann, z.B. über Eigenschaften der Vegetation, die Bodenfeuchte oder über Öl- oder Mineralienvorkommen (siehe Tab. 3.6). Selbst die Überlagerung der Kanäle 1–3 erzeugt daher kein Bild in den echten Farben, da der sichtbare Bereich nicht vollständig abgedeckt wird.

§ 406 Als Beispiel zeigt Abb. 3.47 Aufnahmen der einzelnen Kanäle des TM für eine Szene des St. Francis River im Nordosten von Arkansas zusammen mit der Karte des betreffenden Gebiets. Hinzuweisen ist auf die dünnen und hohen Wolken im oberen Teil der Aufnahme, die insbesondere im Kanal 1 (blau) zu erkennen sind, mit zunehmender Wellenlänge aber immer weniger deutlich sind und im nahen IR (Band 4) verschwinden. Der eigentliche Flusslauf zeichnet sich gegenüber der Marsch in den sichtbaren Kanälen ab, vermischt jedoch mit dem Feuchtgebiet im nahen Infrarot (ein Hinweis auf die hohe Bioproduktivität im Wasser) und im thermischen IR (Flusswasser und Marsch haben gleiche Temperatur). Außerdem wird das schlechte Bodenaufklärungsvermögen der IR-Aufnahme deutlich sowie die Sichtbarkeit der hohen Wolken im Band 6: diese haben eine geringe Temperatur und zeichnen sich im thermischen Infrarot daher deutlich gegen die Erdoberfläche ab.

§ 407 Abbildung 3.48 zeigt entsprechende Aufnahmen für die Keweenaw Halbinsel. In diesem Beispiel ist die Dunststreuung im blauen (und teilweise auch im grünen Kanal) nicht durch Wolken offensichtlich sondern zeigt sich lediglich in einem im Vergleich zum roten Kanal reduzierten Detailreichtum. Letzterer zeigt dagegen, ebenso wie die Infrarot-Kanäle, keine Kontraste im Wasser; insbesondere in Kanal 4 ist, wie in Tab. 3.6 angegeben, die Küstenlinie deutlich zu erkennen. Im blauen Kanal dagegen ist die Küstenlinie wesentlich schlechter zu erkennen; dafür erlauben die unterschiedlichen Graustufen im Wasser eine Abschätzung der Wassertiefe – so, wie wir auch aus dem Bild im sichtbaren Bereich (linkes Teilbild in Abb. 3.49) mehr oder weniger automatisch Rückschlüsse auf die Wassertiefe ziehen würden.

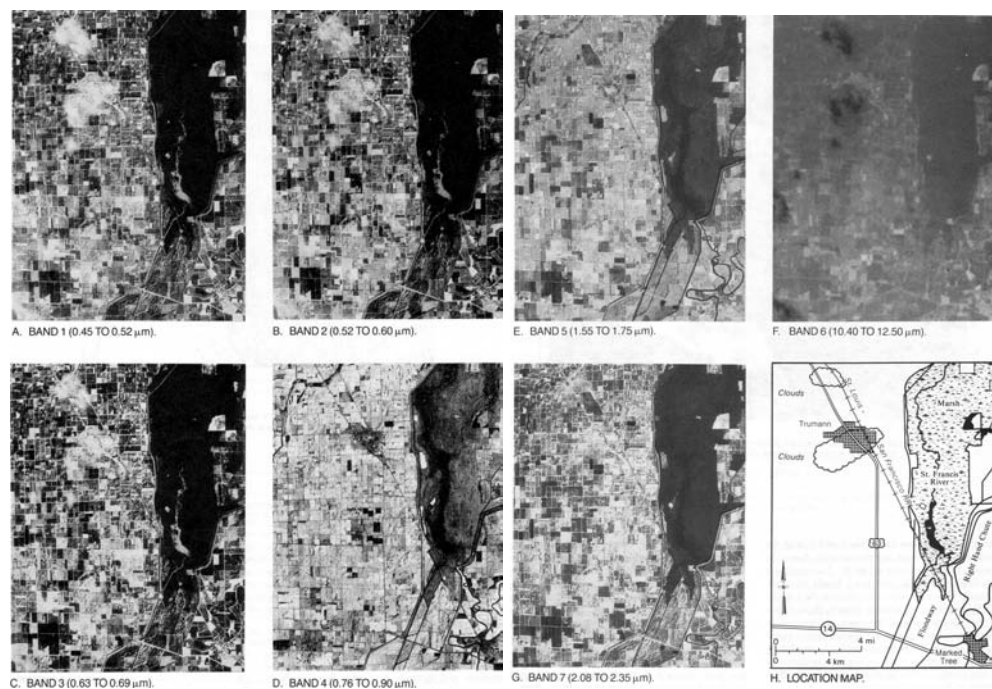


Abbildung 3.47: Einzelbilder der verschiedenen TM Kanäle für eine Szene [209]

§ 408 Abbildung 3.49 zeigt die gleiche Szene wie Abb. 3.48 nicht in Einzelkanälen sondern für Kombinationen von Kanälen. Im linken Teil sind die Kanäle 3, 2 und 1 auf die RGB-Schichten abgebildet, so dass sich annähernd eine Echtfarben-Aufnahme ergibt. Die rechte Seite dagegen ist eine Kombination aus zwei Kanälen im nahen IR und dem roten Kanal in eine Falschfarbenaufnahme mit der Abbildung der Kanäle 5, 4 und 3 auf RGB (d.h. IR2 → rot, IR1 → grün und rot → blau). In Abschn. 9.2 finden Sie die notwendigen Informationen, wie Sie sich auch andere Kombinationen von Kanälen in einem Bild erzeugen können – z.B. wie bei der Waldbrandaufnahme in Abb. 1.14 eine Kombination aus sichtbarer Aufnahme und Aufnahme im thermischen Infrarot.

§ 409 Wir hatten in Abschn. 3.2.6 verschiedene Auflösungsvermögen als charakteristische Merkmale eines Erderkundungsinstrumentes eingeführt. Die Bedeutung des Auflösungsvermögens (räumliches, spektrales und radiometrisches) eines Scanners für die Identifikation von Objekten soll anhand von Abb. 3.50 illustriert werden. Innerhalb eines Bildelements (Pixels) befinden sich auf Grund des begrenzten räumlichen Auflösungsvermögens mehrere verschiedene Objekte, z.B. Vegetation auf rotem Sandstein. Sowohl Vegetation als auch roter Sandstein haben eine typische Spektralcharakteristik. Der Scanner nimmt jedoch nur die kombinierte Spektralcharakteristik (unteres Teilbild) wahr, da ja beide Objekte innerhalb eines Pixels liegen. Zusätzlich wird diese kombinierte Kurve nicht so detailliert wahrgenommen wie im unteren Teil der Abbildung gezeigt, sondern sie ist gerastert, z.B. in die vier in der Abbildung angedeuteten Spektralbereiche des MSS und in eine gewisse Zahl von Helligkeitswerten (radiometrische Auflösung). Eine eindeutige Identifikation des aufgenommenen Objektes (oder Objektclusters) erfordert daher: (a) eine gute räumliche Auflösung, um möglichst wenig verschiedene Objekte innerhalb eines Pixels zu haben, und (b) eine gute spektrale und radiometrische Auflösung, um die kombinierte Spektralcharakteristik möglichst gut reproduzieren zu können. Dann sollte es möglich sein, zu erkennen, dass verschiedene Objekte in dem einen Pixel zusammengefasst wurden und wie groß ihr relativer Anteil ist. Mischpixel (Mixed Pixel) bilden den Hauptteil aller übertragenen Pixel: beim MSS sind für mitteleuropäische Verhältnisse nur etwa 1% der Pixel rein, also von nur einem Material erzeugt. Aufgrund des

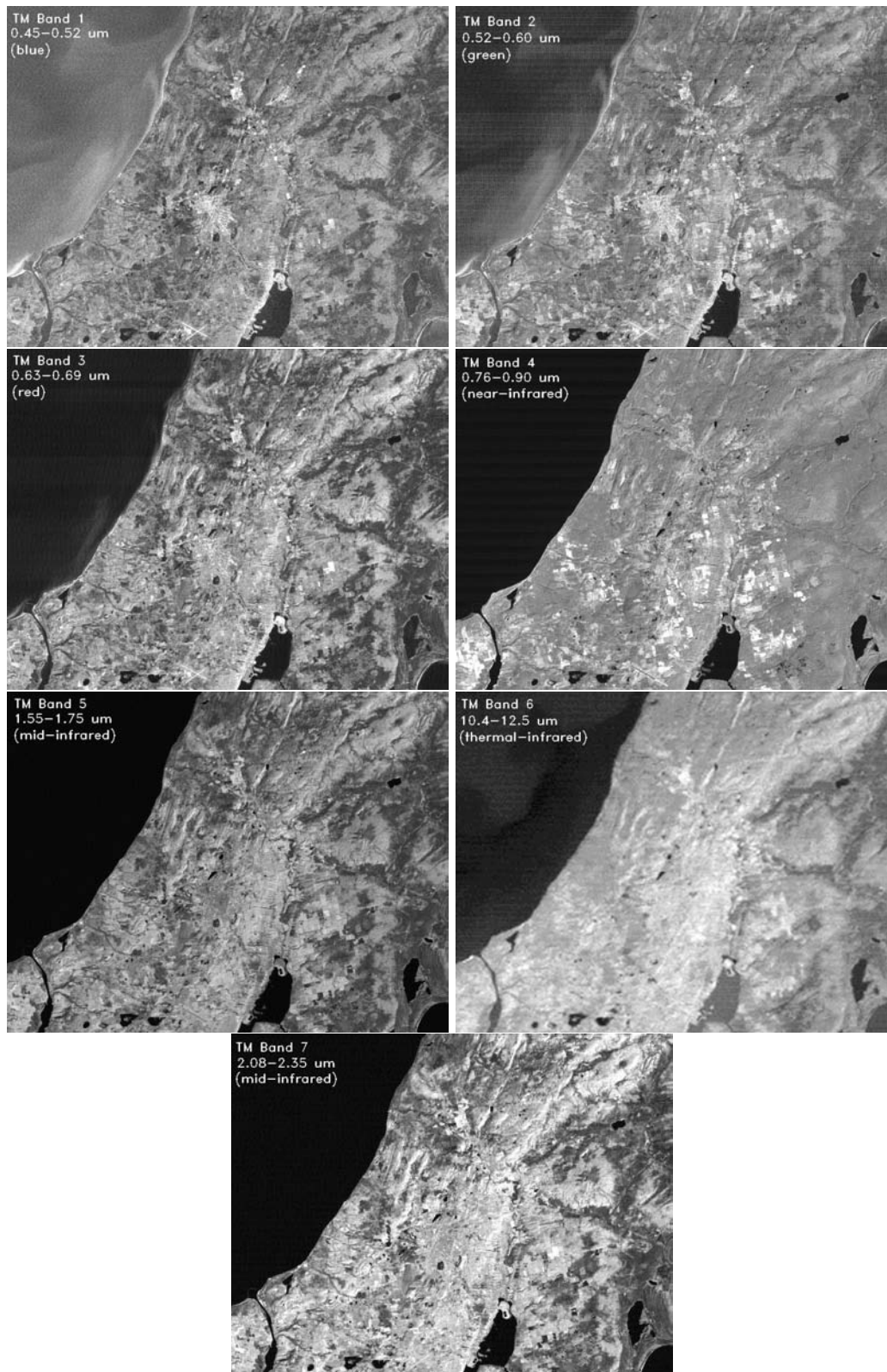


Abbildung 3.48: Keweenaw Halbinsel in den verschiedenen Bändern des LandSat TM [398]



Abbildung 3.49: Die Szene aus Abb. 3.48 in Echt- (*links*) und Falschfarben (*rechts*) [398]

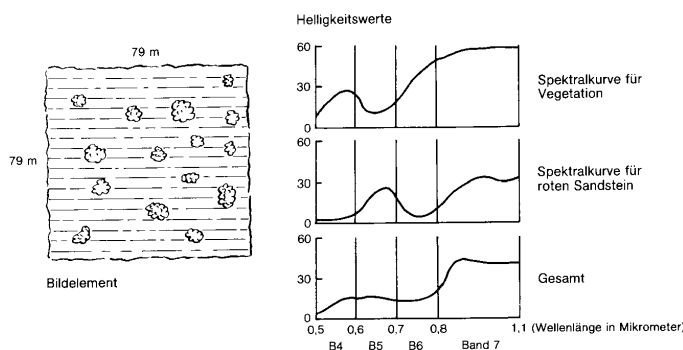


Abbildung 3.50: Integration des spektralen Sensors innerhalb des unmittelbaren Blickfeldes (d.h. innerhalb eines Pixels) eines multispektralen Scanners [154]. Die Bänder entsprechen denen des LandSat MSS

verbesserten räumlichen Auflösungsvermögens sind beim TM schon 18% und bei SPOT der ersten Generation sogar 38% der Pixel rein [163].

§ 410 Interessanterweise lassen sich unter bestimmten Umständen auch Objekte identifizieren, die eigentlich zu klein sind, um bei vorgegebenem Bodenaufklärungsvermögen noch erkannt werden zu können. Ein oft zu beobachtendes Beispiel hierfür ist die Abbildung von Straßen und Eisenbahnstrecken, die oft nur wenige Meter breit sind und trotzdem auf den LandSat-Bildern deutlich zu erkennen sind. Diese Situation ist in Abb. 3.51 dargestellt: ein heller Weg (Helligkeitswert z.B. 80) durchquert eine Landschaft mit relativ geringem Helligkeitswert (ca. 25). Die Helligkeitswerte aller Bildelemente, die von der Straße beeinflusst werden, liegen deutlich über der des Hintergrundes. Der Weg ist daher sichtbar, nimmt aber eine Breite von ein bis zwei Bildelementen ein, d.h. er erscheint als 79 bzw. 158 m breiter Strich und ist daher stark überzeichnet.¹⁵ Die Identifikation als Weg ist nur deshalb möglich,

¹⁵Das Phänomen entspricht dem aus der Kartographie bekannten Problem der Darstellung von Straßen in Karten mit kleinem Maßstab durch den Prozess der Verdrängung: eine Autobahn soll auf einer Karte erkennbar sein, egal ob im Maßstab 1:25 000 einer Wanderkarte oder im Maßstab 1:500 000 einer Autokar-

34	24	36	30	28	27	30	25	33	51	26	33	32	23	29	57	51	25	30	34
26	33	25	33	35	24	33	23	26	29	54	31	33	49	52	28	25	27	25	36
31	23	27	26	23	35	35	28	33	24	36	53	57	26	34	36	23	24	28	35
33	31	30	28	26	26	30	35	27	54	51	27	47	31	26	32	34	36	33	25
29	27	34	24	35	32	29	51	47	24	26	34	29	57	35	26	32	31	23	36
31	24	29	32	25	52	56	35	23	25	34	24	24	29	55	29	25	28	24	29
36	35	32	53	47	24	33	36	25	32	24	36	32	28	31	49	23	33	31	30
25	55	49	29	32	25	31	29	27	28	32	34	33	28	32	30	52	24	29	34
52	28	24	36	28	35	36	31	26	31	36	24	28	30	29	28	34	47	36	33
33	23	34	28	33	28	24	33	32	28	26	34	27	33	27	32	30	36	53	26

Abbildung 3.51: Erscheinungen, die kleiner sind als ein Bildelement, werden sichtbar, wenn sie sich deutlich vom Hintergrund abheben, wie an diesem Beispiel zweier Wege gezeigt wird

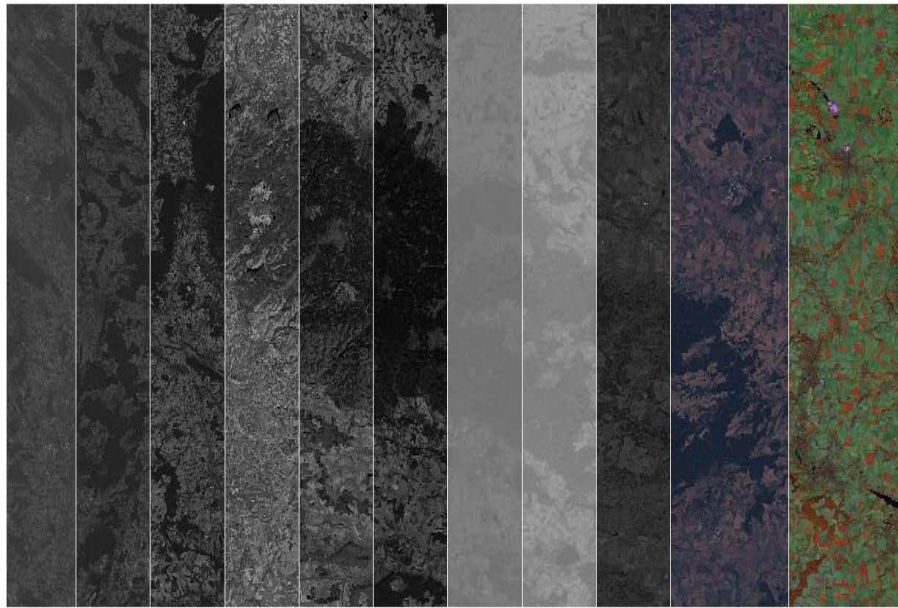


Abbildung 3.52: Der Harz in verschiedenen Frequenzbändern gesehen vom ETM+ auf LandSat 7; von links nach rechts: blau, grün, rot, IR1, IR2, IR3, TIR H, TIR L, Panchromatic, RGB aus rot-grün-blau, Pseudo Farben IR1-IR2-Rot als RGB kombiniert [690]

weil die Ausdehnung in einer Richtung zwar unter Pixelgröße war, in der anderen Richtung aber weit über Pixelgröße. Einzelne sehr kleine, aber sehr helle Objekte würden zwar das entsprechende Pixel aufhellen, wären aber nicht zu identifizieren.

LandSat ETM+

§ 411 Der Enhanced Thematic Mapper ETM [486, 516] ist eine Weiterentwicklung des Thematic Mapper. Der wesentliche Unterschied war die Erweiterung um einen panchromatischen Kanal im Bereich von 500–900 nm mit einem Bodenaufklärungsvermögen von 15 m. Außerdem waren alle 7 Spektralbänder auf einem gemeinsamen Silizium-Wafer integriert. Bodenaufklärungsvermögen und Kanäle entsprachen denen des TM. Die ursprünglich geplante Erweiterung auf eine echte Kehrbesentechnik (und damit der Verzicht auf den Spiegel) ließ sich aus Budgetgründen nicht realisieren. Der ETM wurde für LandSat 6 entwickelt und ist mit diesem verschwunden.

§ 412 Der Enhanced Thematic Mapper Plus ETM+ [714] ist eine Weiterentwicklung des Enhanced Thematic Mapper in dem ursprünglich angestrebten Format als echtes Kehrbeseninstrument. Außerdem wurde das Auflösungsvermögen im thermischen IR von 120 m auf 60 m verbessert, sowie in verschiedenen Spektralkanälen auch das radiometrische Auflösungsvermögen erhöht. Die Eigenschaften des ETM+ sind im Vergleich mit denen der früheren TMs in Tabelle 4.2 zusammen gefasst.

§ 413 Für den TM haben wir die verschiedenen Spektralkanäle und Mischungen bereits in Abb. 3.47 und 3.48 im Detail betrachtet – beim ETM+ ändert sich an den Grundprinzipien nichts, lediglich die Zahl der Spektralkanäle ist größer. Abbildung 3.52 gibt eine grobe Vorstellung über die einzelnen Teilbänder – wobei hier nicht jeder Kanal die gleiche Szene zeigt sondern eine Szene, in diesem Fall der Harz, wie ein Mosaik aus den Bildern verschiedener

te. In beiden Fällen hat die Autobahn, in der Realität mit Mittelstreifen und Böschung vielleicht 25 mm breit, eine Darstellungsbreite von 2 mm. Beim großen Maßstab entspricht dies in der Natur einer noch nicht realitätsfernen Breite von 50 m, beim kleinen Maßstab dagegen locker einer Breite von 1 km.

Channel No.	TIROS-N	NOAA-6, -8, -10	NOAA-7, -9, -11, -12, -14	IFOV (mrad)	Principal use of channel
1	0.550 - 0.90	0.550 - 0.68	0.550 - 0.68	1.39	Day cloud and surface mapping
2	0.725 - 1.10	0.725 - 1.10	0.725 - 1.10	1.41	Surface water delineation, vegetation mapping
3	3.550 - 3.93	3.550 - 3.93	3.550 - 3.93	1.51	SST and fire detection
4	10.50 - 11.50	10.50 - 11.50	10.30 - 11.30	1.41	SST and night time cloud mapping
5	repeat of Channel 4	repeat of Channel 4	11.50 - 12.50	1.30	Surface temperature and day/night cloud mapping
AVHRR/1			AVHRR/2	Instrument configuration/designation	

Channel	Center wavelength (μm)	Spectral Range FWHM (μm)	Channel Noise	Detector Type
1	0.630	0.58 - 0.68	SNR \geq 9:1 @ 0.5% albedo	Silicon
2	0.862	0.725 - 1.00	SNR \geq 9:1 @ 0.5% albedo	Silicon
3a	1.61	1.58 - 1.64	SNR \geq 20:1 @ 0.5% albedo	InGaAs
3b	3.74	3.55 - 3.93	NEAT \leq 0.12 K @ 300 K	InSb
4	10.80	10.30 - 11.30	NEAT \leq 0.12 K @ 300 K	HgCdTe
5	12.00	11.50 - 12.50	NEAT \leq 0.12 K @ 300 K	HgCdTe

Tabelle 3.7: Eigenschaften des Advanced Very High Resolution Radiometer AVHRR auf den POES Satelliten; oben AVHRR/1 und AVHRR/2, unten AVHRR/3 [134]

Kanäle zusammen gesetzt wurde. Die wesentlichen Merkmale sind wieder der Dunstschleier im Blauen (ganz links) sowie die schlechte Auflösung im thermischen Infrarot TIR. Im nahen Infrarot bietet IR1 die höchsten Kontraste – was auch kein Wunder ist, da es sich im wesentlichen um eine ländliche und damit Vegetationsreiche Szene handelt.

NOAA/POES AVHRR

§ 414 Ein dem LandSat-Spektralabtaster ähnliches Instrument ist das Advanced Very High Resolution Radiometer AVHRR [308, 309, 391, 637, 638, 705, 710] auf vielen Satelliten der NOAA/POES- [426, 427, 559, 560, 561, 562] und TIROS-N [592] Serie. Die räumliche Auflösung dieses Scanners ist mit ungefähr 1 km wesentlich schlechter als die der LandSat-Instrumente. Dafür wird aber ein 3 000 km breiter Streifen abgescannt (statt der 185 km beim LandSat MSS). Dadurch ergibt sich eine leichte Überlappung der bei zwei aufeinanderfolgenden Orbits gescannten Fläche, so dass innerhalb eines Tages die ganze Erdoberfläche gescannt werden kann. Diese relativ geringe Auflösung ist für verschiedene meteorologische und ozeanographische Anwendungen vollkommen ausreichend, insbesondere da sie mit einer besseren Zeitauflösung verbunden ist. So werden die AVHRR-Aufnahmen in den USA häufig in der Wettervorhersage verwendet. Die Oberflächentemperaturen der Ozeane können bestimmt werden, da es zwei im thermischen Infrarot arbeitende Kanäle gibt. Schneebedeckungen, Wasserressourcen, Landformen und großflächige Vegetationsuntersuchungen werden ebenfalls mit den Daten dieses Instruments durchgeführt (vgl. [41] und Beispiele in [60]; oder auch Abb. 3.88).

§ 415 Die spektralen Charakteristika der AVHRR-Instrumente der verschiedenen Generationen sind in Tab. 3.7 zusammen gefasst – AVHRR/3 [309] kommt auf den aktuellen NOAA-Satelliten (ab NOAA-15 auch genannt POES-15 [561, 562]) zum Einsatz. Die Auslegung der Spektralkanäle unterscheidet sich von der des TM auf LandSat, da die mit AVHRR zu untersuchenden Fragestellungen andere sind: LandSat als klassischer Geograph verfügt über ein gutes spektrales Auflösungsvermögen im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums. Das AVHRR dagegen wird auf einem Meteorologie-Satelliten geflogen und ist daher eher auf Fragestellungen bezüglich Wolken, Temperaturen der Meeresoberfläche (SST sea surface temperature) und Temperaturmessungen allgemein ausgelegt. Auf Grund der Verwendung als Meteorologie-Satellit beträgt die Wiederholfrequenz einen Tag (sonnensynchrone Bahn mit einer Swath Width größer als der Erdumfang geteilt durch die Zahl der Umläufe pro Tag; für eine bessere Zeitauflösung werden Bahnen von Satelliten in versetzten Orbits kombiniert). Auf Grund der entsprechend großen Swath Width von 2600 km ist das

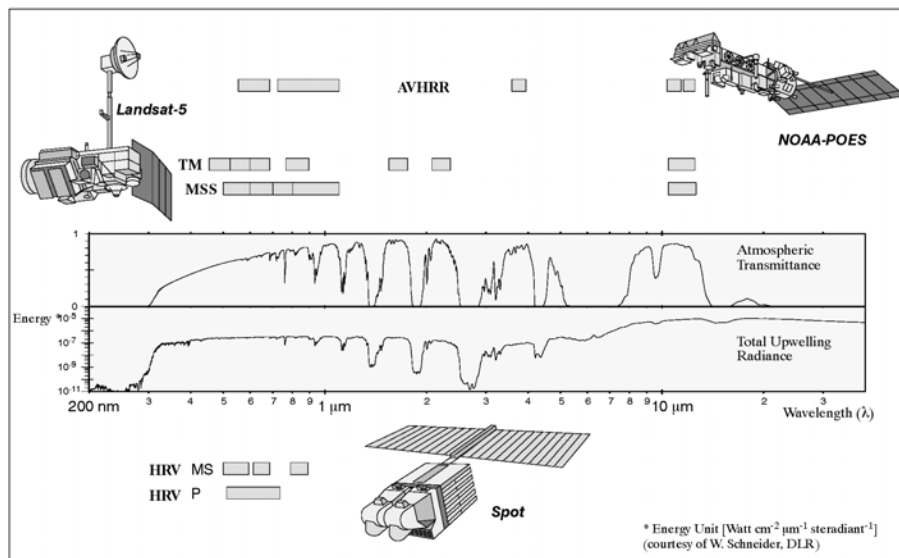


Abbildung 3.53: Spektralkanäle verschiedener klassischer Imaging-Instrumente und Transmission der Erdatmosphäre [134]. Die einzelnen Instrumente sind im Text beschrieben: AVHRR auf NOAA/POES in § 414ff, der Thematic Mapper von LandSat in § 404ff, der Multispectral Scanner MSS ebenfalls auf LandSat in § 399ff und das HRV von Spot in seinen beiden Modi in § 391

Bodenaufklärungsvermögen mit ca. 1 km eher gering. Andererseits ist ein Auflösungsvermögen von 1 km für Wolken oder eine Ozeanströmung immer noch sehr gut und erlaubt wesentlich detailliertere Untersuchungen der Dynamik von Ozeanen und Atmosphäre als es mit einem geostationären Meteorologie-Satelliten möglich ist.

§ 416 Abbildung 3.53 fasst noch einmal die Lage der Spektralkanäle verschiedener Imaging-Instrumente zusammen im Vergleich zur Transmission der Erdatmosphäre.

§ 417 Auf dem Prinzip des Multispektralabtasters arbeitende Kameras werden auch für planetare Missionen verwendet, z.B. Mars 94/96 [175, 294, 379]. Auch die stärkere Erweiterung ins IR wird bei planetaren Missionen verwendet, so hat das Thermal Emission Imaging System THEMIS [655] auf dem Mars Odyssey Orbiter 5 Spektralbänder im sichtbaren und neun im thermischen IR.

Verständnisfrage 26 In § 359 haben wir die Bildverschiebung als einen Aspekt der Verschlechterung des Auflösungsvermögens kennen gelernt. Überlegen Sie sich mögliche instrumentelle Modifikationen (in den voran gegangenen Abschnitten sollten Sie ausreichend Ideen erhalten haben), um die Bildverschiebung klein zu halten.

3.2.10 Und der erdgebundene Beobachter?

§ 418 Nicht alles, was Google Earth und Konsorten anbieten, ist vom Satelliten aus beobachtet. Gerade im hochauflösenden Bereich (und damit wieder in der klassischen Kartographie) greift man auf Aufnahmen von Flugzeugen zurück. Auch wenn der Träger (und damit einige Eigenschaften der Instrumente wie Brennweite und Swath Width) andere sind, die grundlegenden Merkmale sind identisch mit denen der Fernerkundung vom Satelliten aus:

- das Gelände wird in Streifen aufgenommen – wobei das exakte Abfliegen der einzelnen Streifen und die genaue Ausrichtung der Kamera deutlich schwieriger ist als beim Satelliten,
- die Aufnahmen können mit Film oder CCD als Aufzeichnungsmedium vorgenommen werden.

§ 419 Ein Beispiel für eine moderne Luftbildkamera ist die digitale Leica ADS40 [302, 396] von Leica-Geosystems [395]. Die Sensor konstruktion erlaubt die gleichzeitige Aufzeichnung von sieben Bildstreifen: Drei panchromatische CCD-Zeilen erfassen vom Flugzeug aus Informationen in Vorwärts-, Nadir- und Rückwärtsrichtung, während vier spektrale Zeilen Daten im Blau-, Grün-, Rot- und im nahen Infrarotband erfassen. Damit lassen sich panchromatische, Farb- und Falschfarbenaufnahmen erzeugen – im Gegensatz zu den meisten Satelliteninstrumenten liegen hier auch Informationen im blauen Kanal vor. Das räumliche Auflösungsvermögen beträgt bei den Schwarz-Weiß-Stereobildern 5 cm. Beispiele und weitere Erläuterungen zum Messprinzip finden sich unter [63] und [301]. Da die Kamera auch über einen Kanal im nahen IR verfügt, ist ihre Anwendung nicht auf die Kartographie beschränkt sondern kann natürlich auf die Umweltbeurteilung ausgedehnt werden; für Beispiele siehe [70].

3.2.11 Zusammenfassung

§ 420 Wir haben in diesem Abschnitt verschiedene Instrumente kennen gelernt, die das von der Erde reflektierte Licht im sichtbaren und nahen infraroten Bereich aufzeichnen. Da die Instrumente reflektiertes Licht detektieren, handelt es sich um passive Instrumente. Und da sie, auf welche Weise auch immer, die räumliche Information als 2D-Abbildung darstellen, handelt es sich um Imaging Instrumente.

§ 421 Die wichtigsten passiven Imager waren lange Zeit konventionelle photographische Systeme, die außer bei bemannten und vielleicht auch militärischen Missionen immer mehr an Bedeutung verlieren, und durch Scanner und opto-elektronische Detektoren ersetzt werden – heute allerdings mit der Verwendung von CCD-Arrays wieder teilweise an ihre Ursprünge zurück kehren. Wichtigste Kenngrößen dieser Instrumente sind das räumliche und das spektrale Auflösungsvermögen. Insbesondere die Kombination verschiedener Spektralkanäle und die Verwendung des nahen Infrarot sind bei der Interpretation der Bilder (z.B. Identifikation und Bewertung von Vegetation) wichtig.

3.3 Passive Instrumente im nicht-sichtbaren

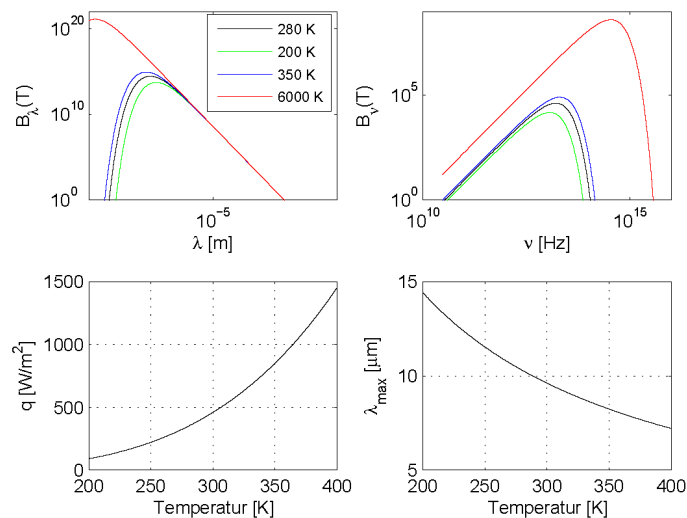
§ 422 Passive Instrumente im nicht-sichtbaren Bereich detektieren die von den Untersuchungsobjekten emittierte Strahlung. Für terrestrische Objekte ist dies im wesentlichen die thermische Infrarot-Strahlung. Bei der Sonne und anderen astrophysikalischen Objekten wird vom Satelliten auch die harte elektromagnetische Strahlung vom Ultraviolett über Röntgen bis hin zur γ -Strahlung untersucht, da diese auf Grund der atmosphärischen Absorption vom Boden aus nicht gemessen werden kann – und umgekehrt natürlich mögliche terrestrische Strahlenquellen in diesem Bereich vom Satelliten nicht detektiert werden können.

§ 423 Weitere Instrumente detektieren die von terrestrischen Objekten emittierte Mikrowellenstrahlung (passive Mikrowelleninstrumente) oder den über das gesamte Spektrum integrierten Strahlungsstrom (Solarkonstante bzw. deren reflektierter Anteil).

3.3.1 Thermisches Infrarot

§ 424 Instrumente, die im thermischen Infrarot arbeiten, messen die Temperaturstrahlung von Objekten. Auch einige der in Abschn. 3.2.7 erwähnten Scanner haben mindestens einen Kanal, der im thermischen IR misst – und benötigen daher einen entsprechenden Detektor. Die untersuchten Objekte können die Oberflächen der Ozeane, Vegetation, Landoberflächen aber auch Wolken sein. Will man die Daten dieser Instrumente auswerten, so benötigt man eine Umrechnung der Intensität der elektromagnetischen Strahlung über einen gewissen Wellenlängenbereich im Infraroten auf eine Temperatur. Die physikalische Grundlage hierfür sind die Strahlungsgesetze, insbesondere das Stefan-Boltzmann-Gesetz und das Wien'sche Verschiebungsgesetz.

Abbildung 3.54: Planck'sche Kurven für verschiedene Temperaturen (*oben*) sowie Strahlungsstrom (Stefan-Boltzmann Gesetz, *unten links*) und Wellenlänge des Maximums (Wien'sches Verschiebungsgesetz, *unten rechts*) in Abhängigkeit von der Temperatur



Strahlungsgesetze

§ 425 Die Strahlungsgesetze sind unter der Annahme formuliert, dass sich ein System im (lokalen) thermodynamischen Gleichgewicht befindet und erlauben eine Charakterisierung des von einem Körper ausgesandten Strahlungsfeldes in Abhängigkeit von der Temperatur. Betrachten wir dazu einen Hohlraum, dessen Wände auf einer konstanten Temperatur T gehalten werden (z.B. in einem Wärmebad dieser Temperatur). Von diesen Wänden werde Strahlung in den Hohlraum emittiert und die aus diesem auf die Wände fallende Strahlung wird von letzterem ganz oder zum Teil absorbiert. Je größer die Strahlungsmenge im Hohlraum ist, umso größer wird auch die auf die Wände fallende Menge sein, und um so größer auch die von ihnen absorbierte Menge. Die Menge der Strahlung im Hohlraum wird daher zu- oder abnehmen, bis der Verlust durch Absorption der von den Wänden ununterbrochen emittierten Strahlung gerade das Gleichgewicht hält. Die Gleichgewichtsverteilung der Strahlung, sowohl im Bezug auf ihre Dichte als auch im Bezug auf ihre Frequenz, wird durch die Temperatur der Wände vollkommen bestimmt.

§ 426 Das Kirchhoff-Planck'sche Gesetz beschreibt das Verhältnis von spektralem Absorptionsvermögen a_λ zu spektralem Emissionsvermögen ϵ_λ für einen beliebigen Körper im thermodynamischen Gleichgewicht:

$$\epsilon_\lambda = a_\lambda \cdot S_\lambda(T) .$$

Darin ist die Ergiebigkeit $S_\lambda(T)$ eine universelle Funktion der Temperatur und der Frequenz. Sie wird auch als Quellfunktion bezeichnet.

§ 427 Für $a_\lambda = 1$ ergibt sich maximale Absorption und damit auch die maximale Ausstrahlung für den Körper. Ist $a_\lambda = 1$ für alle λ , so handelt es sich um einen schwarzen Körper und die universelle Funktion der Temperatur wird durch das Planck'sche Strahlungsgesetz beschrieben. Dieses gibt an, wie viel Strahlungsenergie pro Wellenlängeneinheit von einer Flächeneinheit eines schwarzen Körpers in einer Zeiteinheit in einen Einheitsraumwinkel abgestrahlt wird:

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda T}} - 1} \quad \text{oder} \quad B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} .$$

Die Planck-Kurven für verschiedenen Temperaturen sind im oberen Teil von Abb. 3.54 gegeben: mit zunehmender Temperatur nimmt der Gesamtstrahlungsstrom zu (Stefan-Boltzmann Gesetz) und das Maximum der Planck-Kurve verschiebt sich zu kürzeren Wellenlängen (Wien'sches Verschiebungsgesetz).

§ 428 Die gesamte Ausstrahlung eines schwarzen Körpers ergibt sich durch Integration über die Planck'sche Strahlungskurve. Der Zusammenhang zwischen Gesamtstrahlungsstrom und Temperatur wird durch das Stefan–Boltzmann Gesetz beschrieben:

$$q = \pi \int_0^{\infty} B_{\lambda}(T) d\lambda = \sigma T^4, \quad (3.5)$$

Die gesamte Ausstrahlung eines schwarzen Körpers ist also einzig eine Funktion seiner Temperatur und der universellen Stefan–Boltzmann-Konstante $\sigma = 5.67051 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$.

§ 429 Für beliebige andere (d.h. nicht-schwarze) Körper lässt sich bei der Definition eines mittleren Emissionsvermögens $\bar{\epsilon}$ die von der Fläche in den Halbraum abgegebene Gesamtenergie bestimmen zu

$$q = \sigma \bar{\epsilon} T^4. \quad (3.6)$$

§ 430 Das Stefan-Boltzmann Gesetz erlaubt eine einfache Abschätzung der Temperatur eines Körpers. Es wird auch auf Körper angewendet, die keine schwarzen Strahler sind. In diesem Falle definiert man dann die Effektivtemperatur eines Körpers als die Temperatur, die ein schwarzer Strahler haben müsste, um den gleichen Gesamtstrahlungsstrom zu emittieren:

$$q = \sigma T_{\text{eff}}^4. \quad (3.7)$$

Zwischenrechnung 14 Schätzen Sie ab, wie stark sich der Unterschied zwischen T und T_{eff} mit zunehmendem $\bar{\epsilon}$ verändert.

§ 431 Das Wien'sche Verschiebungsgesetz ergibt sich aus dem Planck'schen Strahlungsgesetz durch Ableitung nach λ und Nullsetzen. Es beschreibt die Wellenlänge des Maximums der Planck'schen Kurve in Abhängigkeit von der Temperatur des Strahlers:

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = \text{const} = 2884 \mu\text{m K}.$$

Mit Hilfe des Wien'schen Verschiebungsgesetzes lässt sich bei bekannter Wellenlänge des Maximums unter der Annahme, dass der Körper ein schwarzer Strahler sei, dessen Temperatur abschätzen.

Verständnisfrage 27 Betrachten Sie typische Temperaturen auf der Erdoberfläche. Lässt sich λ_{max} vom Satelliten aus bestimmen – beliebig feines spektrales Auflösungsvermögen vorausgesetzt?

Detektortypen

§ 432 Elektromagnetische Strahlung im infraroten Bereich kann über zwei Verfahren nachgewiesen werden: (a) die Absorption kann durch Wärmetransport auf den Detektor erfolgen; das Ausgangssignal ist der Widerstand des Detektors, d.h. es wird die Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit zur Bestimmung der Erwärmung ausgenutzt. (b) die Absorption des Photons hebt ein Elektron aus dem Valenz- in das Leitfähigkeitsband eines geeigneten Halbleiters.

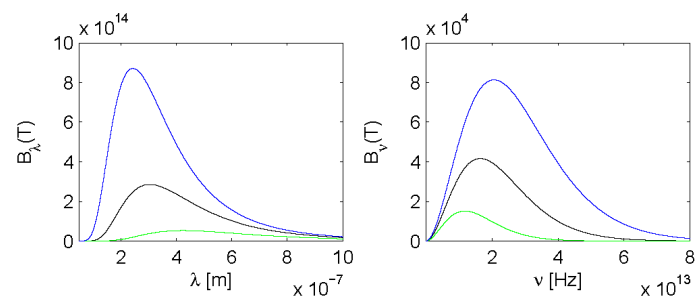
§ 433 Photonen im thermischen Infrarot haben nur eine geringe Energie, viele zum Nachweis des IR verwendete Detektoren überdecken nicht den Bereich, in dem die Planck'sche Kurve bei Raumtemperatur ihr Maximum hat (Größenordnung $10 \mu\text{m}$, siehe auch Abb. 3.54) sondern sind für Photonen mit höherer Energie empfindlich. Tabelle 3.8 gibt einen Überblick über gebräuchliche Materialien und die Wellenlängenbereiche, in denen sie einsetzbar sind.

§ 434 Nachweisverfahren für Photonen im thermischen Infrarot werden mit zunehmender Wellenlänge immer problematischer: auch Satellit und Instrument emittieren thermische Photonen mit den ihrer Temperatur entsprechenden Wellenlänge; für eine Abschätzung gemäß Wien'schem Verschiebungsgesetz siehe Abb. 3.54. Eine Trennung der Planck-Kurven von Detektorsystem und Zielobjekt ist nicht möglich, da der Wellenlängenbereich des Strahlers

Photodetector materials	Spectral Range (μm)	Comments
Si (silicon)	0.2 - 1.1 (UV, VNIR)	1.1 μm is the cut-off wavelength for detection of light imposed by the fundamental band-gap of Si
Ge	0.4 - 1.8	
HgCdTe (also referred to as MCT - mercury cadmium telluride)	1 - 20	MCTs are the most important material for IR detectors and arrays. MCT operates in photovoltaic mode. Recent advancements in LPE p-on-n back-side-illuminated detector technology have extended the cut-off wavelength to 17 μm
PtSi	3 - 5 (MWIR)	Schottky-barrier diode detector
InAs	1 - 3.8	
InSb (77K)	1 - 5.5 (SWIR, MWIR)	InSb operates in photovoltaic mode
HgZnTe		
QWIP	3 - 19	For low background, long wavelength applications

Tabelle 3.8: Detektormaterialien zur Messung im Infraroten und ihre Abhängigkeit von der Wellenlänge [134]

Abbildung 3.55: Planck-Kurven für Detektor und Untersuchungsobjekt und Messstrategien zur Reduktion des Fehlers durch die thermische Emission von Detektor und Satellit



mit der geringeren Temperatur immer eine Teilmenge des Wellenlängenbereichs des Strahlers mit der höheren Temperatur ist – und letzterer in allen Wellenlängen einen größeren Strahlungsstrom emittiert.

§ 435 Gemäß dieser Argumentation wäre die ideale Konfiguration zur Temperaturmessung mit Hilfe eines IR-Sensors ein Sensor (inkl. Gehäuse etc.) mit einer Temperatur am absoluten Nullpunkt. Dann verschwindet die zugehörige Planck-Kurve und es wird nur das Spektrum (und damit die Effektivtemperatur) des Untersuchungsobjekts gemessen.

§ 436 Der absolute Nullpunkt ist nicht erreichbar; selbst unter Laborbedingungen noch vergleichsweise einfach zu erzeugende tiefe Temperaturen lassen sich auf einem Satelliten nicht einfach erzeugen. Daher muss ein Kompromiss gefunden werden zwischen der Störung auf Grund der thermischen Emission von Detektor und Gehäuse und den Möglichkeiten der Kühlung. Rein auf der Basis der Planck-Kurven lassen sich zwei Strategien entwickeln, siehe Abb. 3.55: (a) das Verhältnis der Gesamtstrahlungsströme von (Zielobjekt + Detektor) und Detektor soll maximal werden oder (b) es wird der relativ kurzwellige Teil der Planck-Kurve des Zielobjekts erfasst und der langwellige Teil, in dem die Detektortemperatur ein relativ großes Störsignal bildet wird gar nicht mit gemessen. Da in diesem Fall nicht mehr der Gesamtstrahlungsstrom sondern nur ein Teilintegral unter der Planck-Kurve gebildet wird, muss der Algorithmus zur Bestimmung der Effektivtemperatur entsprechend modifiziert werden.

Verständnisfrage 28 Lässt sich aus dem Teilstrahlungsstrom die Effektivtemperatur eindeutig rekonstruieren?

Zwischenrechnung 15 In der Fernerkundung interessiert in der Regel der Temperaturbereich von -30 bis $+40^\circ$. Schätzen Sie den Fehler in der Bestimmung der Effektivtemperatur für verschiedenen Detektortemperaturen zwischen 150 und 220 K ab.

Zwischenrechnung 16 Schätzen Sie für die Angaben aus Zwischenrechnung 15 eine Grenzwellenlänge ab, bei der das Instrument das Spektrum abschneiden soll, um den Einfluss der Detektortemperatur auf die Bestimmung der Effektivtemperatur zu verringern.

Detector / Operating Temperature	300 K	190 K	80 K	1.5 - 60 K
PbS	3.0 μm	3.3 μm	3.6 μm	-
PbSe	4.4 μm	5.4 μm	6.5 μm	-
InSb	7.0 μm	6.1 μm	5.5 μm	5.0 μm
HgCdTe (PV mode)	1-3 μm	1-5 μm	3-12 μm	10-16 μm
HgCdTe (PC mode)	1-11 μm	3-11 μm	5-25 μm	12-25 μm
Extrinsic Si	-	-	-	8-32 μm
Extrinsic Ge	-	-	-	7-200 μm

Tabelle 3.9: Temperaturabhängigkeit des Cutoffs im IR für verschiedene Detektormaterialien [134]

Verständnisfrage 29 Sie haben auf Basis von Zwischenrechnung 15 die Detektortemperatur dem engestrebten Fehler entsprechend angepasst. Ist Ihr System auch dann brauchbar, wenn das Instrument plötzlich für die Überwachung eines Vulkans verwendet werden soll?

§ 437 Verständnisfrage 28 ist eigentlich eine Fangfrage: kein auf einem Satelliten betriebenes Instrument im thermischen Infrarot misst wirklich den von einem terrestrischen Objekt emittierten Gesamtstrahlungsstrom: selbst wenn alle störende thermische Emission beseitigt werden könnte (Instrument und Satellit sind auf den absoluten Nullpunkt gekühlt), ist das gemessene Spektrum der thermischen Strahlung unvollständig, da die Atmosphäre gerade im thermischen IR stark absorbiert, siehe Abb. 3.3 und 3.82. Letztere Abbildung zeigt gleichzeitig auch, dass die Atmosphäre in einigen dieser Bereiche im thermischen IR emittiert¹⁶ – es wird also ein kombiniertes Spektrum von thermischer Emission von Erdboden und Atmosphäre gemessen. Daher ist die Interpretation der gemessenen Strahlungsströme nicht ganz einfach; die Kombination mehrerer Spektralbänder im thermischen IR liefert genauere Resultate als die Verwendung eines einzigen Kanals; insbesondere im Hinblick auf die unterschiedlichen Anteile der vom Erdboden und von der Atmosphäre emittierten Strahlung.

§ 438 Doch zurück zur Umgebungstemperatur. Tabelle 3.9 gibt die Cutoff-Wellenlängen für verschiedenen Detektormaterialien in Abhängigkeit von der Temperatur: eine Temperatur von 300 K entspricht ungefähr Zimmertemperatur, 190 K sind repräsentativ für thermoelektrische Kühlung und Kühlmittel wie Freon-13 oder Trockeneis; 80 K entspricht der Temperatur von flüssigem Stickstoff. Für den Bereich zwischen 1.5 und 60 K benötigt man flüssiges Ne, H oder He. Instrumente im nahen IR (wie die einfacheren Scanner wie MSS auf LandSat oder HRV auf SPOT) arbeiten mit Detektoren, die in der Regel nicht unter 200 K gekühlt werden müssen. Dies lässt sich auf einem Satelliten durch geschickte Anordnung und Abstrahlflächen erreichen. Für Detektoren im Bereich von 1.1 – 17 μm , d.h. im thermischen IR, werden typischerweise Temperaturen zwischen 50 und 80 K benötigt.

§ 439 Für ein Laborexperiment lassen sich diese Temperaturen mit Hilfe von flüssigem Stickstoff recht einfach erzeugen – auf einem Satelliten benötigt man stattdessen einen Cryocooler. Diese Kleinst-Kühlschränke erreichen Temperaturen, die im Bereiche des Siedepunkts von Stickstoff von 77 K liegen können bis hinunter zum Siedepunkt von He bei 4 K. Eine Übersicht gibt [456]. Das typischerweise für Satelliteninstrumente verwendete Verfahren beruht auf dem Stirling-Motor – nur eben in nicht als Wärme- sondern als Kältemaschine betrieben [618, 653].

§ 440 Mit der Entwicklung von Sensoren für das thermische IR, die keine Kühlung mehr benötigen, werden die Möglichkeiten dieser Instrumente deutlich erweitert – die Planung für EmberSat [145] ist ein Beispiel für die Verwendung dieses neuen Typs von Detektoren, Stuttgarts fliegendes Laptop (Flying Laptop Microsatellite [703]) ein anderes.

¹⁶Die Absorption des vom Erdboden emittierten thermischen IR durch die Atmosphäre (bzw. genauer das in der Atmosphäre enthaltene CO₂ und den Wasserdampf) und die anschließende isotrope Emission thermischen IRs ist die Grundzutat für den Treibhauseffekt: auf diese Weise wird ein Teil der vom Erdboden emittierten Strahlung auf diesen zurück geworfen und führt zur Erwärmung.

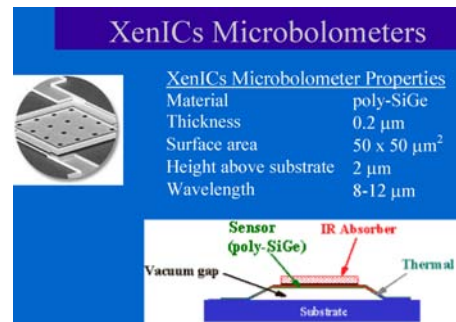


Abbildung 3.56: Microbolometer [168]

Messprinzip

§ 441 Thermisches IR besteht aus Photonen geringer Energie. Daher erfolgt, im Gegensatz zu Röntgen- oder Gammastrahlung (siehe Abschn. 5.2.1), der Nachweis nicht für einzelne Photonen sondern über kollektive Effekte: es wird die durch Absorption des einfallenden Lichts erzeugte Erwärmung gemessen. Letztere wird in der Regel nicht direkt sondern indirekt über den sich mit der Erwärmung ändernden elektrischen Widerstand bestimmt. Geräte dieser Art werden als Bolometer bezeichnet.

§ 442 Für die Erdfernerkundung von besonderem Interesse sind die Microbolometer im mittleren [29] und thermischen IR [168, 332]: diese benötigen keine externe Kühlung, sind günstig und lassen sich als Array arrangieren, so dass Thermographie möglich wird.¹⁷ Abbildung 3.56 zeigt den Aufbau eines Pixels eines Microbolometers. Alle Pixel sind auf einem gemeinsamen Substrat aufgebracht, in der Regel eine Silizium-Schicht, die auch dem Auslesen dient. Der einzelne Pixel besteht aus einem Absorber und an seiner Unterseite dem eigentlichen Sensor, ein polykristallines SiGe-Gemisch. Die Lücke zwischen Substrat und Absorber beträgt ca. 2 μm , die Fläche des Pixels ca. 50 x 50 μm^2 . Die Kontaktierung zwischen Sensor und Substrat muss (a) thermisch leitfähig sein (sonst ist der Sensor zu träge und reagiert nicht auf Temperaturänderungen) und (b) elektrisch leitfähig sein (sonst ist ein Auslesen über das Substrat nicht möglich).

§ 443 Der Widerstand des Sensors ist von der Temperatur abhängig gemäß

$$R(T) = R_0 \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right)$$

mit E_a als der Aktivierungsenergie, T der Temperatur, k der Boltzmann-Konstante und R_0 einem nominellen Widerstand. Daraus lässt sich ein Koeffizient $\tau_{R(T)}$ für die Änderung des Widerstands mit der Temperatur bestimmen zu

$$\tau_{R(T)} = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = -\frac{E_a}{kT^2}.$$

Die Aktivierungsenergie E_a lässt sich aus einer Messreihe (Labor) $R(T)$ bestimmen:

$$\ln R(T) = \frac{E_a}{kT} + \ln R_0.$$

§ 444 Die Empfindlichkeit eines Mikrobolometers ist beschränkt durch die thermische Leitfähigkeit des Pixels. Die Ansprechgeschwindigkeit hängt zusätzlich natürlich auch von der Wärmekapazität ab. Eine Verringerung der Wärmekapazität führt auf ein schnelleres Ansprechen, führt aber auch auf größere statistische Fehler. Eine Vergrößerung der Wärmeleitfähigkeit erhöht zwar die Geschwindigkeit des Ansprechens, reduziert aber die Empfindlichkeit.

¹⁷Der lange Zeit führende Entwickler von Microbolometern ist Raytheon [654], ein Mischkonzern, der sich u.a. mit Produkten wie Sidewinder, Patriot oder Anti-Ballistic Early Warning Systems beschäftigt. Die Kombination ist nicht überraschend: derartige Systeme benötigen zuverlässige, kleine und unempfindliche Detektoren im IR.

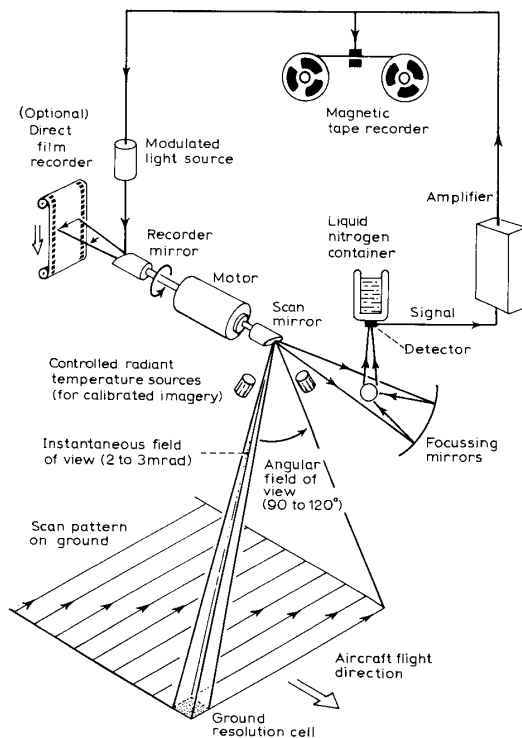


Abbildung 3.57: Prinzip eines Infrarotscanners [41]

Instrumente

§ 445 Nachdem wir die physikalischen Grundlagen zur Interpretation der Daten kurz beschrieben haben, wollen wir uns jetzt den Grundlagen des Gerätes zuwenden. Abbildung 3.57 zeigt das Funktionsprinzip eines Scanners, der im thermischen Infrarot arbeitet. Dieser Scanner unterscheidet sich von den opto-mechanischen Scannern wie z.B. dem MSS auf Landsat nur geringfügig. Auch hier wird mit Hilfe eines Drehspiegels ein Streifen senkrecht zur Flugrichtung abgetastet. Die Signale werden mit Hilfe einer Spiegeloptik auf einen Detektor projiziert. Wird ein geeigneter Detektor in Kombination mit Detektoren im Sichtbaren/nahen IR eingesetzt, so ist ein scannender Spiegel für alle Wellenlängenbereiche ausreichend. Daher können die Universalinstrumente wie MSS, TM und AVHRR zusätzlich zum Sichtbaren und nahen IR auch thermisches IR messen. Scanner zur Beobachtung der Erdoberfläche arbeiten innerhalb der atmosphärischen Fenster zwischen $3.5 - 5.5 \mu\text{m}$ und zwischen $8.0 - 14.0 \mu\text{m}$ (vgl. auch Abb. 3.3 und 3.53 sowie Tab. 3.6).

§ 446 Der entscheidende Unterschied zu einem im sichtbaren Licht arbeitenden Scanner liegt in der Betriebsweise des Detektors: da die Abbildung eigentlich ein Flugzeuginstrument zeigt, wird der Detektor hier mit flüssigem Stickstoff auf 73°K heruntergekühlt, um sein thermisches Rauschen zu verringern. Die Kühlung erfolgt mit flüssigem Stickstoff. Die in Abb. 3.57 angedeutete Speicherung der Signale auf Film erfolgte nur bei den ersten vom Flugzeug eingesetzten Infrarotinstrumenten, heutzutage wird nur Digital verarbeitet.

§ 447 Spezielle Instrumente zur Messung im thermischen IR haben jedoch ein größeres spektrales Auflösungsvermögen als die Universalinstrumente. Ein klassisches Beispiel ist das TIR-Instrument auf der Heat Capacity Mapping Mission HCMM [522, 608]. Letzteres lieferte die ersten relativ hochauflösenden Daten im thermischen Infrarot mit einem Bodenauflösungsvermögen von 600 m und einem radiometrischen Auflösungsvermögen von 256 Kanälen innerhalb einer Temperaturskala von 260 K bis 340 K (entsprechend einer Temperaturauflösung von 0.4 K). Mit dieser Auflösung lassen sich Wälder, landwirtschaftlich genutzte Flächen und bebauten Gebiete unterscheiden, ja sogar der innerstädtische Temperaturgradient (im Zentrum wärmer als zu den Rändern) ist deutlich erkennbar. Selbst Autobahnen

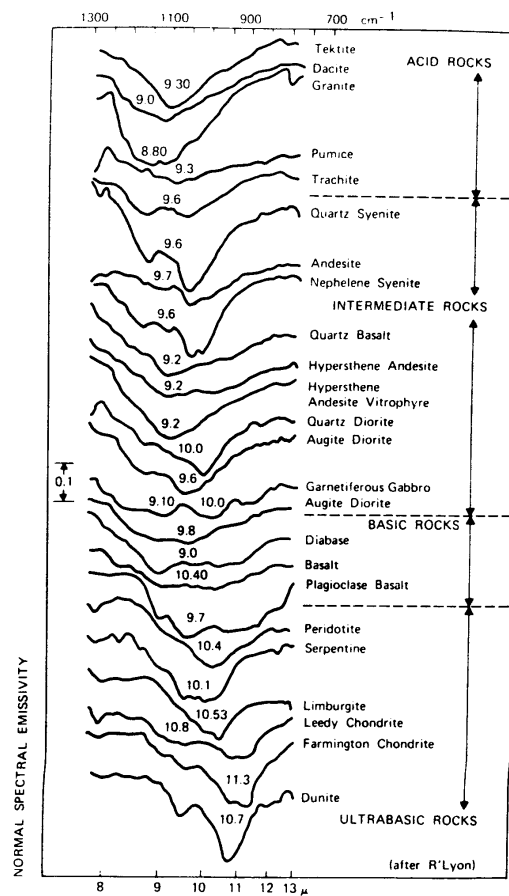


Abbildung 3.58: Spektrale Signaturen von Gestein. Viele Gesteinsarten unterscheiden sich durch ihre spektrale Emission im thermischen Infrarot voneinander [11]

zeigen sich im thermischen Infrarot als deutliche Wärmebänder. Im Vergleich dazu erlaubt der Kanal 6 des TM keine Differenzierung städtischer Bereiche, siehe auch die Beispielszene in Abb. 3.48.

§ 448 Eine ausführliche Beschreibung von Daten und Datenverarbeitung sowie Dateninterpretation für HCMM findet sich in Großmann [80], der auch eine große Zahl von Beispielen für bearbeitete und unbearbeitete Aufnahmen im thermischen Infrarot zeigt. Man sollte beachten, dass die Teilinformationen über den Zustand der Vegetation nicht aus dem thermischen Infrarot kommen (das wäre die Temperatur der Pflanze), sondern aus dem nahen Infrarot (reflektiertes Infrarot, sehr stark von der internen Blattstruktur und damit dem Stress, dem die Pflanze ausgesetzt ist, abhängig). Fragen an die thermischen Infrarotaufnahmen sind eher von der Art, ob sich anthropogene Einflüsse auf den Wärmehaushalt von Landflächen erkennen lassen [80]. Auch unterirdische Kohlefeuer lassen sich im thermischen IR identifizieren [236].

§ 449 Hat ein Instrument ein ausreichend feines spektrales Auflösungsvermögen, so lassen sich auch einzelne Gesteinsarten unterscheiden. Wie in Abb. 3.58 gezeigt, haben verschiedene Gesteinsarten durchaus unterschiedliche Charakteristika im spektralen Emissionsvermögen im infraroten Bereich. Ein anderes Beispiel für die Anwendung von Infrarotsensoren ist das Temperature Humidity Infrared Radiometer (THIR [587]) auf Nimbus 4 bis Nimbus 7 [558]. Dieses nutzt die Infrarotstrahlung der Wolken aus, um Karten der Wolkenbedeckung zu erzeugen, gemessen wird in zwei relativ schmalen Bändern um $6.8 \mu\text{m}$ (Wasserdampf) und $11.5 \mu\text{m}$ (IR Fenster). Hier ist z.B. die Kopplung zwischen Veränderungen in der Wolkenbedeckung und im Zirkulationssystem der Ozeane von Interesse (z.B. El Niño und die Southern Oscillation, ein Wechsel zwischen warmen und kalten Oberflächenströmungen im Südpazifik,

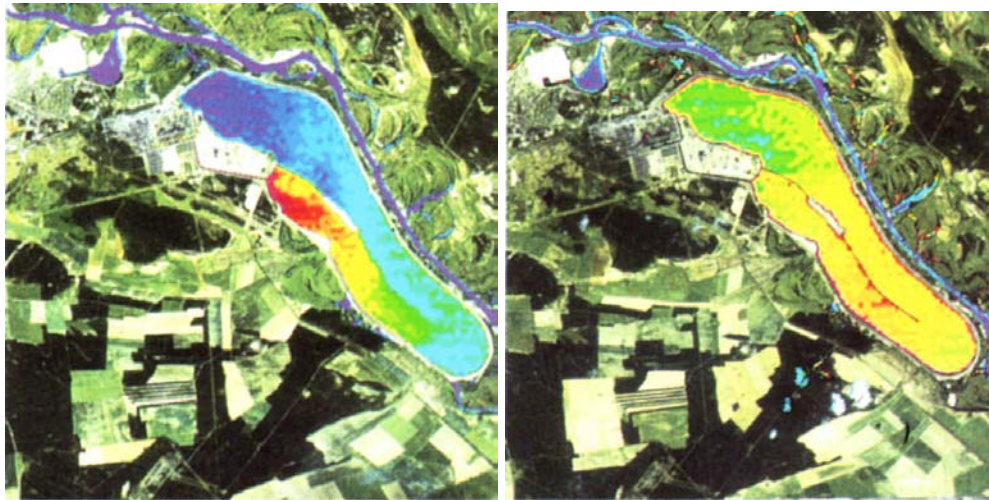


Abbildung 3.59: Tschernobyl 1985 (*links*) und 1986 (*rechts*), Aufnahme im thermischen Infrarot, LandSat [33]

die sowohl für die regionale Ökologie und Ökonomie als auch für das großräumige Klima eine starke Bedeutung haben, siehe auch Abb. 10-4 in [41]).

§ 450 THEMIS [39, 655, 469, 701] auf Mars Odyssey ist ein Beispiel für ein modernes IR Instrument auf einer planetaren Mission: es verwendet ein ungekühltes Array von Mikrobolometern. Damit lässt sich ein leichtes (12 kg) Instrument mit geringer Leistungsaufnahme (14 W) aber gleichzeitig guter spektraler und räumlicher Auflösung erzeugen. Im sichtbaren Bereich zwischen 0.4 und 0.8 μm arbeitet THEMIS in 5 Spektralbändern mit einer Auflösung von 20 m; im thermischen Infrarot wird im Bereich von 6.5 bis 15.5 μm in 9 Spektralbändern gemessen. Das Bodenaufklärungsvermögen beträgt ca. 100 m. Das gute spektrale Auflösungsvermögen im thermischen Infrarot soll ein besseres Verständnis der geologischen Prozesse auf dem Mars ermöglichen – Abb. 3.58 sollte auch für die entsprechenden Gesteine auf dem Mars gelten, allerdings ist das atmosphärische Fenster, über das das Spektrum bestimmt werden kann, größer als auf der Erde. Daher ist die größere Zahl von Spektralkanälen sinnvoll – was wiederum eine bessere Unterscheidung der einzelnen Gesteinsarten erlaubt, siehe auch [39].

Anwendung: Tschernobyl

§ 451 Abbildung 3.59 zeigt, wie Abb. 3.27, einen Vorteil der Erdfernerkundung mit Hilfe von Satelliten: das Monitoring und damit die Entdeckung von Veränderungen. Hier sind Aufnahmen im thermischen Infrarot (Wasserflächen) mit einer Aufnahme im sichtbaren (Landflächen) kombiniert für Tschernobyl. Die linke Aufnahme wurde von LandSat 1985 gemacht: die Einleitung des Kühlwassers aus dem Reaktorblock in den See ist als deutliches thermisches Signal zu erkennen. Entsprechend ist der See am anderen Ende auf Grund des aus den Flüssen zugeführten Wassers relativ kalt. Die rechte Aufnahme aus dem Jahre 1986 zeigt den still gelegten Reaktor, erkennbar an der nun relativ gleichmäßigen Temperatur des Sees, dem Fehlen einer ausgeprägten Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Auslass des Reaktorblocks sowie der thermischen Isolation vom benachbarten kühleren Flusssystem.

§ 452 Die thermische Infrarot-Aufnahme erlaubt damit, im Gegensatz zur Aufnahme im sichtbaren Bereich, nicht nur die Identifikation von strukturellen Veränderungen (Baumaßnahmen bzw. in diesem Fall Zerstörung der Reaktorgebäude) sondern würde auch bei intakter Struktur eine Identifikation veränderter Betriebsmodi erlauben.

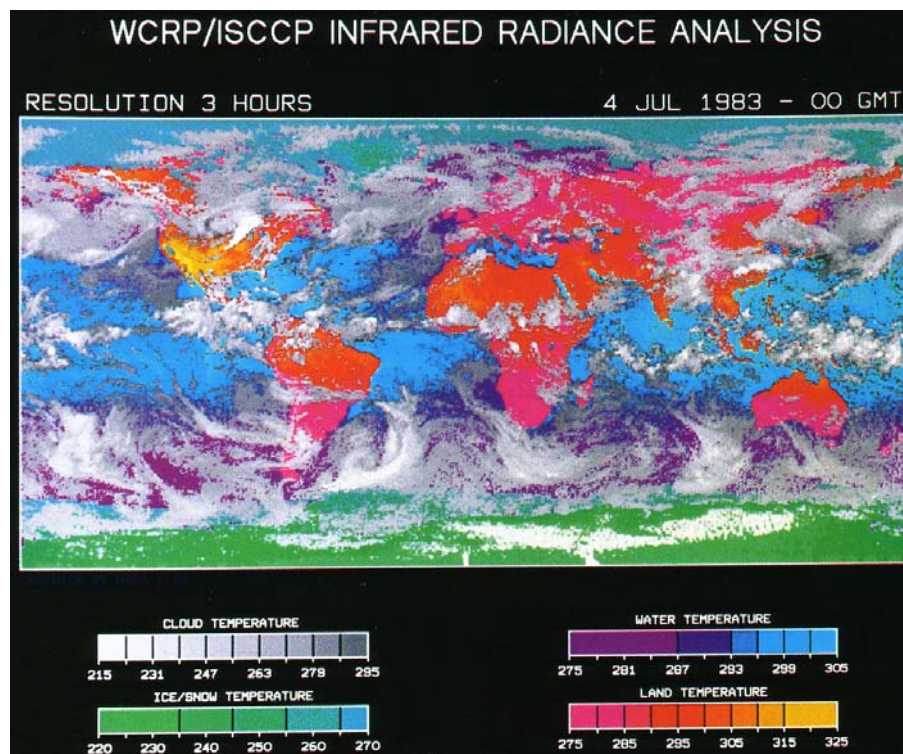


Abbildung 3.60: Zusammengesetzte Aufnahme von Wolken-, Land- und Meeresoberflächentemperaturen [196]

§ 453 Abbildung 3.60 zeigt ein Beispiel für eine weiter bearbeitete Aufnahme im thermischen Infrarot: in dieser Aufnahme sind Informationen von verschiedenen (meist geostationären) Wettersatelliten zu einer innerhalb von insgesamt 3 h entstandenen globalen Aufnahme kombiniert. Mit Hilfe eines Wolkenidentifikationsalgorithmus wurde bestimmt, ob eine bestimmte Stelle bewölkt war oder nicht, entsprechend wurde der Bildpunkt einer der Temperaturskalen für Wolken, Eis und Schnee, Wasser oder Land zugeordnet. Das Bodenaufklärungsvermögen beträgt ungefähr 40 km.

Anwendung: Unterirdischer Wasserlauf

§ 454 Dass Satelliten zur Untersuchung der Hydrosphäre, d.h. der Wasserschicht des Planeten verwendet werden, ist einleuchtend, insbesondere wenn man berücksichtigt, dass 70% der Erdoberfläche durch Wasser bedeckt sind. Der größte Teil dieses Wassers befindet sich in den Ozeanen, süßwasserhaltige Gewässer machen nur einen kleinen Teil der Oberflächengewässer aus. Weitere Süßwasservorkommen befinden sich unterhalb der Erdoberfläche, so findet sich z.B. ein sehr großes Reservoir fossilen Wassers unter der Sahara [109]. Die Entdeckung und Beobachtung unterirdischer Wasserreservoirs und -ströme durch Satelliten mag vielleicht auf den ersten Blick eine etwas befremdliche Aufgabe der Erdfernerkundung sein. Warum sollte man durch den Blick von außen auf die Erde in der Lage sein, Wasservorkommen unterhalb der Erdoberfläche zu erkennen? Was sind die spezifischen Merkmale solcher Wasservorkommen?

§ 455 Wenn man sich Aufnahmen im thermischen Infrarot, d.h. im Bereich der von einem Körper emittierten Wärmestrahlung ansieht, so fallen Wasserflächen in der Regel sofort auf, da sie aufgrund ihrer großen Wärmekapazität tagsüber oft kühler, nachts aber wärmer sind als ihre Umgebung – und da sie kaum einen Tagesgang in der Temperatur zeigen (Beispiele z.B. in [209]). Insbesondere das Signal eines Wasserkörpers als warmes Element auf einer

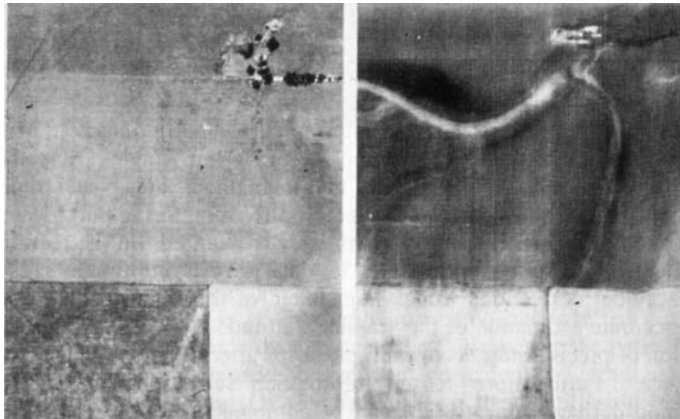


Abbildung 3.61: Unterirdische Wasserläufe werden im thermischen Infrarot sichtbar [41]

nächtlichen Aufnahme kann man sich bei der Suche nach bzw. Überwachung von unterirdischen Wasserflächen zu Nutze machen. Abbildung 3.61 zeigen dies sehr anschaulich in einem Vergleich einer im sichtbaren Licht gemachten Aufnahme mit einer Aufnahme im thermischen Infrarot. Im sichtbaren Licht lassen sich unter landwirtschaftlich genutzten Flächen keine Hinweise auf Wasser finden.

§ 456 Im thermischen Infrarot zeichnen sich nachts dagegen deutlich zwei Wasseradern ab. Deren Temperaturunterschied zur Umgebung lässt sogar einige Rückschlüsse auf die Eigenschaften dieser Wasseradern zu: die eine Ader zeichnet sich sehr hell ab, d.h. sie ist deutlich wärmer als der sie umgebende Boden. Das lässt auf eine relativ schnelle Strömung des Wassers schließen, da bei langsamer Strömung ein Wärmeaustausch mit der Umgebung stattgefunden hätte. Diese wasserführende Ader besteht daher aus ziemlich grobem Material, das eine relativ hohe Durchflussgeschwindigkeit erlaubt. Eine andere Wasserader dagegen zeichnet sich nur wesentlich schwächer gegenüber der Umgebung ab, das Material muss also relativ schlecht wasserdurchlässig sein, so dass Wärmeaustausch mit der Umgebung stattfinden kann.

§ 457 So attraktiv dieses Verfahren auch erscheinen mag, unterirdische Wasseradern mit Hilfe von Satellitenaufnahmen im thermischen Infrarot aufzuspüren, so deutlich muss man auch die Einschränkung sehen: liegen die Wasseradern oder Reservoirs in einer größeren Tiefe als ca. 5 m, so ist (a) der Tagesgang der Temperatur zu gering und die Wasservolumina haben ungefähr die Umgebungstemperatur angenommen und (b) selbst bei schnell fließenden Gewässern ist das bis an die Oberfläche dringende Signal zu schwach, um im Rauschen erkannt zu werden.

Anwendung Meere: Golfstrom

§ 458 Die Untersuchung von Oberflächentemperaturen von Gewässern ist eine der Hauptanwendungen für Sensoren im thermischen Infrarot – auch das Beispiel in Abb. 3.59 basiert ja auch der Untersuchung von Oberflächentemperaturen.

§ 459 Abbildung 3.62 zeigt als Beispiel den Golfstrom. Deutlich zu erkennen ist der Kern des Golfstroms (gelb), wie er sich von Florida relativ dicht entlang der Ostküste in nordöstlicher Richtung ausbreitet. Durch Instabilitäten kommt es zur Ausbildung von Wirbeln und damit zu einer Auflösung der eigentlichen Stromstruktur.

§ 460 Die relativ deutliche Grenze zwischen kaltem (blau) und wärmerem (rot, gelb) Wasser im oberen Teil der Abbildung weist allerdings auch auf ein Problem bei der Verwendung von Falschfarbenaufnahmen hin: die Grenze wird durch die Veränderung der Farbe von Rot nach Blau wesentlich deutlicher hervor gehoben als ein Bereich, in dem sich die Farbe von Gelb nach Rot ändert – obwohl der Temperatursprung der gleiche ist. Daher stets Vorsicht vor Rot in Falschfarbenaufnahmen: rot hat eine hohe Signalwirkung, ist bei Falschfarben aber

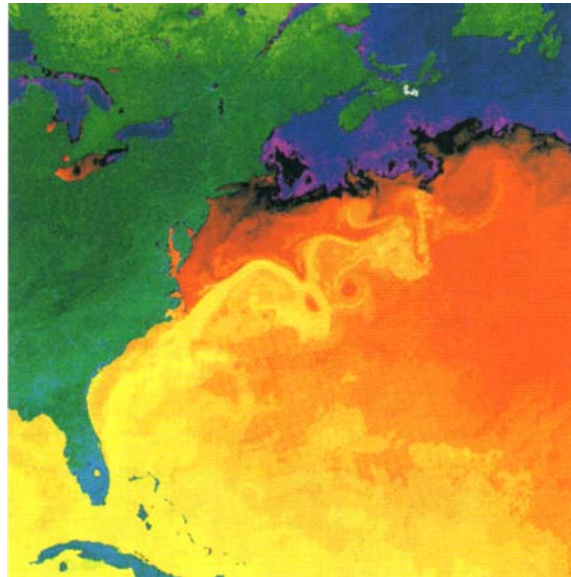


Abbildung 3.62: Der Golfstrom im thermischen Infrarot [233]

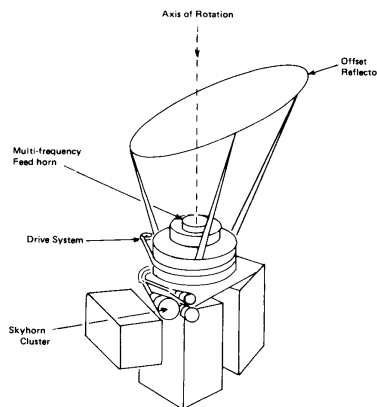


Abbildung 3.63: Scannendes Multifrequenz Mikrowellenradiometer [41]

häufig einfach nur eine Abstufung wie jede andere Farbe auch. Daher werden trotz moderner Aufnahmetechniken in der Medizin CT-Scans und ähnliches immer noch in Graustufen dargestellt und nicht in Farben.

3.3.2 Passive Mikrowelleninstrumente

§ 461 Passive Detektoren im Mikrowellenbereich haben gegenüber anderen Detektoren zwei Vorteile: (a) sie arbeiten auch bei Bewölkung und (b) sie arbeiten auch nachts, da sie nicht die reflektierte solare Strahlung messen, sondern die von den Körpern emittierte Mikrowellenstrahlung. Dieses Prinzip haben sie mit den Detektoren im thermischen Infrarot gemeinsam. Dem steht jedoch ein entscheidender Nachteil der Mikrowellendetektoren gegenüber: auf Grund der großen Wellenlängen ist das räumliche Auflösungsvermögen dieser Detektoren gemäß (3.3) gering. Auch ist der emittierte Strahlungsstrom im Mikrowellenbereich nur gering, d.h. die radiometrische Auflösung ist schlecht. Oder anders formuliert: ein gutes räumliches Auflösungsvermögen wäre nur bei langen Belichtungszeiten zu erreichen; das geringe Auflösungsvermögen sorgt zumindest dafür, dass der geringe Strahlungsstrom über eine ausreichende Fläche integriert eine messbare Größe ergibt.

Zwischenrechnung 17 Schätzen Sie den Strahlungsstrom bei 0.15 cm ab und vergleichen Sie ihn mit dem im thermischen IR bei $11\ \mu\text{m}$. Schätzen Sie ab, wie groß die auf einen Messpunkt abgebildete Fläche im Vergleich zu der im thermischen IR sein muss, um eine

vergleichbare Zahl von Photonen auftreffen zu lassen. Hilft es, wenn Sie Öffnungswinkel des Instruments und Detektorfläche im Gegensatz zum Instrument im TIR deutlich vergrößern?

§ **462** Die von der Erdoberfläche emittierte thermische Emission im Mikrowellenbereich lässt sich charakterisieren über ihre Intensität, ihre Polarisation, ihre Frequenz und den Winkel, unter dem sie beobachtet wird. Alle vier Größen hängen von der betrachteten Oberfläche, insbesondere der Temperatur und der Emissivität. Auf Grund der geringen Intensitäten ist das Hauptproblem im Instrumentdesign die Reduktion des Rauschens.

§ **463** Dazu gehört nicht nur, wie bei Instrumenten im thermischen IR, das Rauschen des Sensors sondern auch der Einfluss von Störquellen. Passive Mikrowellensensoren detektieren Strahlung von vier Quellen:

- von der Atmosphäre emittierte Strahlung,
- an der Erdoberfläche reflektierte Strahlung,
- von der Erdoberfläche emittierte Strahlung,
- Strahlung aus tieferen Bodenschichten.

Die Quellen koexistieren, so dass die Interpretation der Messungen einiges Nachdenken erfordert. So lässt sich die am Erdboden reflektierte Strahlung auf einfache Weise durch Messung nur auf der Nachtseite eliminieren. Die Emissionen von Atmosphäre und Erdboden (bzw. tieferen Bodenschichten) lässt sich durch Verwendung unterschiedlicher Frequenzen und Berücksichtigung der atmosphärischen Transmission unterscheiden. Allerdings gibt es auch eine starke Störgröße für Mikrowelleninstrumente: Mikrowellen werden natürlich auch von Kommunikationssystemen in immer größerem Maße verwendet. Daher gibt es einen hohen Mikrowellenuntergrund. Letzterer verschlechtert das Signal- zu Rausch-Verhältnis, normalerweise gegeben als

$$r_v = \frac{I_{\text{signal}}}{I_{\text{noise}}} = F \left(\frac{T_S^4 \lambda^2}{R^2 T_R^4} \right)$$

mit λ als der Wellenlänge, T_R als der Temperatur des Empfängers (Receiver), T_S als der Temperatur des Zielobjekts bzw. der Erdoberfläche und R als dem Abstand.

Verständnisfrage 30 Können Sie die Abschätzung für das Signal- zu Rausch-Verhältnis physikalisch begründen?

§ **464** Passive Mikrowellensensoren arbeiten bei Frequenzen zwischen 200 GHz und 1 GHz bzw. Wellenlängen zwischen 0.15 cm und 30 cm. Das räumliche Auflösungsvermögen verringert sich daher um drei bis vier Größenordnungen, wenn wir vom infraroten Bereich in den Mikrowellenbereich gehen. Für die kürzeste Wellenlänge (Frequenz von 37 GHz) des Scanning Multichannel Microwave Radiometer SMMR [568] auf Nimbus-7 [558] ergibt sich eine Pixelgröße von 18 km x 27 km, für seine längste Wellenlänge (entsprechend 6.6 GHz) eine von 95 km x 148 km. Die Hauptanwendungsgebiete von passiven Mikrowelleninstrumenten liegen daher in den Bereichen, in denen ein sehr gutes räumliches Auflösungsvermögen nicht unbedingt erforderlich ist. Dazu gehören die Meteorologie (Messung von Temperaturprofilen in der Atmosphäre) und die Ozeanographie (z.B. Meereisbedeckung, insbesondere die Veränderungen der Meereisbedeckung in der Arktis und Antarktis als eine Art Frühwarnsystem für globale Temperaturänderungen).

§ **465** Das Bodenauflösungsvermögen A_G als die vom Sensor betrachtete oder besser aufgelöste Fläche eines passiven Mikrowelleninstruments hängt ab von der Wellenlänge λ , der Reichweite R , der Fläche A_A der empfangenden Apertur und dem Scan-Winkel ϑ :

$$A_G = \frac{\lambda^2 R^2 \sec^2 \vartheta}{A_A}.$$

Je größer die Antenne und je kleiner die Wellenlänge, um so größer das Bodenauflösungsvermögen. Beim Übergang vom thermischen IR in den Mikrowellenbereich reduziert sich das Bodenauflösungsvermögen einer gegebenen Antenne um drei bis vier Größenordnungen.

§ 466 Das reduzierte Bodenaufklärungsvermögen lässt sich aber auch positiv formulieren: Mikrowelleninstrumente mitteln über Details hinweg. Zwar lässt sich nicht genau erkennen, welchem Pinguin in der Antarktis gerade sein Lieblings-Eiszacken abgebrochen ist – die relativen Anteile von Landeis zu Schelfeis zu Meereis zu eisfreiem Meer lassen sich jedoch gleichsam ‘auf einen Blick’ erkennen. Außerdem erlaubt eine geringe räumliche Auflösung ein größeres Blickfeld. Damit wird bei gleichem Orbit die Wiederholfrequenz größer – was z.B. bei der Beobachtung von driftendem Meereis ein Vorteil ist gegenüber einem erst über 21 Tage aufgebauten LandSat Mosaik.

§ 467 Der erste ein passives Mikrowellensystem zur Erdfernerkundung tragende Satellit war Kosmos 243 [509], gestartet im September 1968.¹⁸ Das Radiometer hatte 4 Kanäle (8.5 cm entsprechend 3.5 GHz, 3.4 cm entsprechend 8.8 GHz, 1.35 cm entsprechend 22.2 GHz und 0.8 cm entsprechend 37.5 GHz) zur Bestimmung von atmosphärischem Wasserdampf, Flüssigwassergehalt, Eisbedeckung und Temperatur der Meeresoberfläche. Das Instrument hat nicht gescannt sondern einfach nur seinem Blickwinkel entsprechend entlang der Bodenspur abgetastet. Die ersten amerikanischen Mikrowelleninstrumente flogen auf Nimbus 5 [557]: das Nimbus E microwave Spectrometer NEMS [549] als einfaches Radiometer, das Electrically Scanning Microwave Radiometer ESMR [515] als Scanner; mit letzterem Instrument sollte die Temperaturstruktur der Atmosphäre bestimmt werden. Einen Überblick über frühe passive Mikrowellenradiometer und ihre Eigenschaften gibt Tab. 3.10.

§ 468 NEMS (Nimbus E microwave Spectrometer [549]) misst in fünf Kanälen: 22.24 GHz, 31.40 GHz, 53.65 GHz, 54.90 GHz, und 58.80 GHz. Diese Kanäle entsprechen einem Band, in dem Wasserdampf absorbiert, einem Band im atmosphärischen Fenster sowie drei Bändern im 5 mm, bei denen O₂ absorbiert. Damit lassen sich Wasserdampfgehalt ebenso wie Flüssigwassergehalt der Atmosphäre bestimmen. ESMR (Electrically Scanning Microwave Radiometer [515]) ist, wie der name nahe legt, ein scannendes Instrument. Es misst bei Frequenzen von 19.35 und 37 GHz, entsprechend Wellenlängen von 1.55 cm and 0.81 cm.

§ 469 Auf den modernen Instrumenten (MWR und AATSR [304] auf EnviSat; AMSU [307, 415] und AMSR [306, 488] auf Aqua [413] sowie MLS [320, 419] auf Aura [417] als Bestandteile des A-Train [494], siehe auch Abschn. 4.8.3) zur genaueren Untersuchung der Atmosphäre sind entsprechend modernere Mikrowelleninstrumente im Einsatz. Die dabei verwendeten Verfahren sind ähnlich dem Standardverfahren zur Messung der Ozonsäule in der Atmosphäre: man misst die emittierte Mikrowellenstrahlung bei zwei Wellenlängen, wobei bei einer Wellenlänge das zu untersuchende Spurengas ein starker Absorber ist, bei der anderen jedoch nicht. Letztere dient als Referenzwellenlänge, um die unbekannte Stärke der Strahlungsquelle abzuschätzen. Das Verhältnis der Intensitäten an den beiden Wellenlängen erlaubt es, die Konzentration des absorbierenden Spurengases zu bestimmen.

§ 470 Mikrowellen können direkt zur Bestimmung der dielektrischen Eigenschaften der Erdoberfläche verwendet werden, da sich diese direkt im Emisjons- und Reflektionsvermögen für Mikrowellen widerspiegeln. Die für die dielektrischen Eigenschaften bestimmende Größe ist der Feuchtegehalt der Oberfläche. Zwar beeinflusst auch das in der Atmosphäre enthaltene Wasser (sei es als Dampf, als Tröpfchen oder als Eiskristalle) die Mikrowellen, jedoch sind alle diese Einflüsse unterschiedlich, d.h. sie erzeugen ein spezifisches Signal und können damit identifiziert werden. Beim thermischen IR arbeitet man ähnlich: Wellenlängen innerhalb des atmosphärischen Fensters geben Informationen über den Erdboden, Wellenlängen außerhalb der Fenster Informationen über die Atmosphäre. Und die Blickrichtung (Nadir, Limb) liefert weitere Unterscheidungsmöglichkeiten.

¹⁸Das erste zivile Mikrowelleninstrument flog bereits 1962 auf Mariner 2 (siehe auch Tab. 3.10), allerdings nicht zur Erdbeobachtung sondern zur Beobachtung der Venus während eines Fly By. Sein Auflösungsvermögen von 1300 km ist nicht so sehr durch das Instrument bestimmt sondern auch durch den großen Abstand von 34 773 km während des Fly By [541].

Launch Year	Spacecraft	Sensor	Frequencies (GHz)	Antenna Type	Swath Width (km)	Spatial Resolution (km)	Prime parameters measured or inferred (i.e. objectives)
1962	Mariner 2 (V. fly-by)		15.8, 22.2	Mech. scanned parabola		1300	Limb darkening of planetary emission, temperature
1968	Cosmos 243		3.5, 8.8, 22.2, 37, same	Nadir-viewing parabola same		13	Atm: water vapor, liquid water content; Sfc: temp., sea ice concentration
1970	Cosmos 384						
1972	Nimbus-5	ESMR NEMS	19.3 22.2,31.4, 53.6,54.9,58.8	Electrically scanned array 5 lens-loaded horns, nadir	3000	25 200	Atm: rain rate; Sfc: sea temp., ice concentration Atm: temp. profile, water vapor; Sfc: ice classification, snow cover
1973	Skylab	S 193 S 194	13.9 1.4	Mech. scanned parabola nadir-viewing	180	16 115	Surface: winds, precipitation Surface: soil moisture
1974	Meteor		37	Dual-polariza. 35° from nadir			Atm: Liquid water content
1975	Nimbus-6	ESMR SCAMS	37 22.2,31.6,52.8 53.8, 55.4	Elec. scanned array, dual pol. 3 rot. hyperb. mirrors	1300 2700	20 x 43 150	Same as Nimbus-5 ESMR Same as Nimbus-5 NEMS
1978	DMSP	SSM/T	50.5,53.2,54.3 54.9,58.4,58.8 59.4	Single rotating mirror	1500	174	Atm: Temp. profile
1978	Tiros-N	MSU	50.3,53.7,55.0 57.9,	Dual rotating mirrors	2300	110	Atm: Temp. profile
1978	Seasat,	SMMR	6.6,10.7,18, 21, 37	Offset-fed osc. parabola, dual polarization	600	18 x 23	Atm: water vapor, rain rate, Sfc: sea temp. wind speed, ice concentration, snow cover,
1978	Nimbus-7	same			800	22 x 35	
1979	Cosmos 1076, 1151	Device v Device π	3.53, 9.37, 22.2, 37.5 9.37	Nadir-viewing parabola (no scanning)	Swath = 18 km at 0.8 cm (37.5) Swath = 80 km at 8.5 cm (3.53 GHz)		Sea surface: temp, wind speed, vapor in clouds, etc.
1979	Bhaskara-I (ISRO)	SAMIR	19.1,19.6,22.2	Fixed antenna spinning S/C same	150 & 1000 same	150	Atm: water vapor, liquid water content Atm: same, surface rain, wind
1981	Bhask.-II (ISRO)	SAMIR	19.35,22.235, 31.4			125	
1987	DMSP	SMM/I	19.35,22.235, 37,85.5	Offset-fed rot. parabola, dual-polarization	1400	16 x 24	Atm: water vapor, liq. content; surface wind, sea ice, snow cover, soil moisture
1987	MOS-1	MSR	23.8, 31.4	Offset Cassegrain, mech. scan, dual-pol.	317	23	Atm: water vapor content, surface ice, snow,
1988	Okean-O1	RU-08	37.5	Scanning	550	15 x 20	Atm. water content
1991	ERS-1	ATSR-MWR	23.8, 36.5	Offset antenna		20	Atm. water content (vapor and liquid), MW emission
1991	UARS	MLS	63,183,205	3 mirror, scanning at 5.5 sec/scan	N/A	3 km	Atm: limb sounding, concentration of ClO, H ₂ O, O ₃ , and atm. pressure
1992	ATLAS-1	MAS	61,62,63,183, 184, 204			10 (vert.) 4 for higher freq.	Atm: limb sounding, pressure, temp., concentration of ozone, water, etc.
1992	TOPEX/Poseidon	TMR	18, 21, 37	Offset oscillating parabola, dual oscillator	N/A	30 km	Total water content, in nadir to correct the altimeter path for water vapor

Tabelle 3.10: Übersicht über frühe passive Mikrowelleninstrumente [134]; alle genannten Satelliten und Instrumente können – auch unter den Acronymen – im Master Catalog des NSSDC [505] gefunden werden

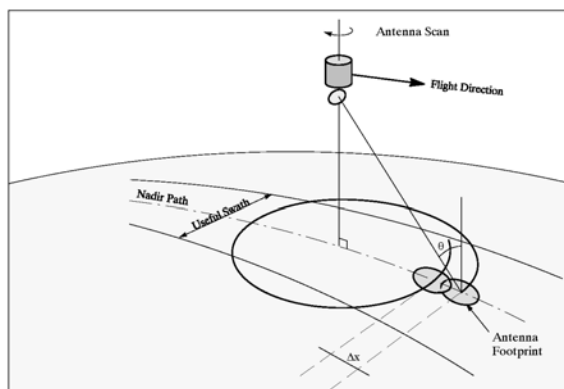


Abbildung 3.64: Scannendes Mikrowellenradiometer: im Gegensatz zum oszillierenden Spiegel im optischen Scanner tastet ein scannendes Mikrowellenradiometer nicht Streifen senkrecht zur Flugrichtung ab; stattdessen folgt der Fußpunkt der Antenne (entsprechend dem momentan betrachteten Bildpunkt) einer Zykloide [134]

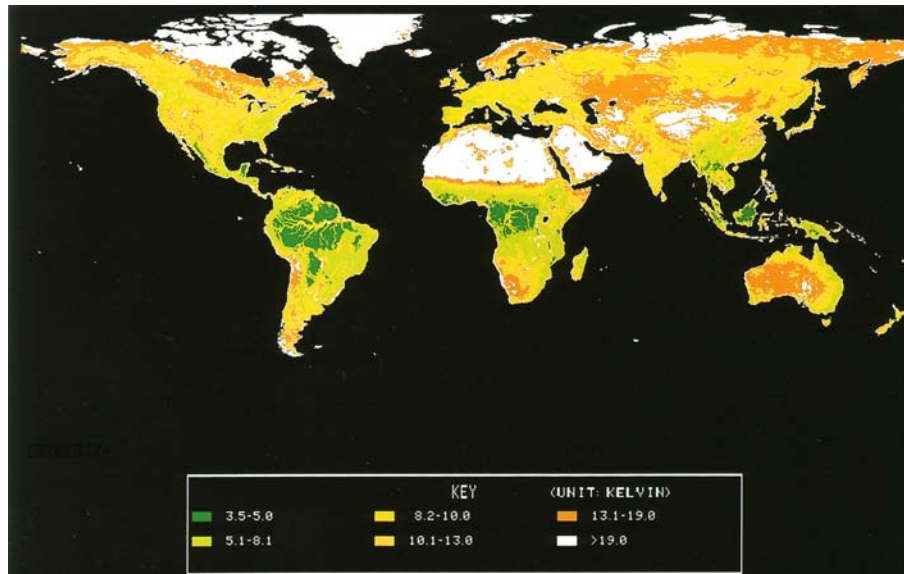


Abbildung 3.65: Polarisationsunterschiede bei 37 GHz beobachtet mit dem Scanning Multi-Channel Radiometer SMMR auf Nimbus-7 [38]

§ 471 Abbildung 3.63 zeigt den schematischen Aufbau eines scannenden Mikrowellenradiometers. Gescannt wird durch zwei Bewegungen, die Rotation des Instruments und die Vorwärtsbewegung des Satelliten. Da das einfallende Signal nur sehr gering ist, ist eine Reduktion des Rauschens des Empfängers ein wesentlicher Bestandteil. Der Empfänger besteht im wesentlichen aus einer Hochgewinnantenne, anschließender Signalverarbeitung und einer Quelle für ein Referenzsignal. Zum Arbeitsprinzip und zum Verständnis technischer Details sei auf [198] verwiesen.

§ 472 Im Gegensatz zu einem im optischen arbeitenden Scanner oszilliert der Spiegel nicht sondern er rotiert – das hat ganz triviale mechanische Gründe. Durch diese Rotation wird nicht ein Streifen senkrecht zur Bodenspur abgescannt. Stattdessen folgt der Fußpunkt der Antenne (und damit der momentan betrachtete Bildpunkt) einer Zykloide, siehe Abb. 3.64.

§ 473 Neben dem Scanner werden auch Sounder als passive Mikrowelleninstrumente verwendet. Diese erstellen vertikale Profile von Spurengasen, in dem sie in der Nähe der Resonanzfrequenzen dieser Moleküle messen. Sounder im Sinne der Limb-Sounder werden mit Mikrowellen aufgrund der schlechten vertikalen Auflösung nicht häufig realisiert; MLS [320, 419] auf Aura [417] ist jedoch ein Beispiel dafür, das das Verfahren funktioniert.

§ 474 Abbildung 3.65 zeigt als Beispiel für Daten von einem passiven Mikrowelleninstrument die über den Zeitraum von Januar 1979 bis Dezember 1986 gemittelten Polarisationsunterschiede (horizontal vs. vertikal) bei 37 GHz, beobachtet vom Scanning Multi-Channel Radiometer SMMR auf Nimbus-7. Über unbewachsenen Oberflächen ist diese Differenz relativ groß (25 bis 35 K), mit zunehmender Vegetationsdichte verringert sich diese. Daher kann ein Mikrowelleninstrument auch zur großräumigen Überwachung von Vegetation und zur Untersuchung von Desertifikation verwendet werden. In der Abbildung erkennt man die höchsten Werte des Polarisationsunterschieds über den großen Wüsten (Sahara, Namib, Rub Al Khali usw.), die geringsten über den Regenwäldern Brasiliens, Kameruns und Indonesiens. Und selbst in der Sahara sind die Bergregionen von Ahaggar, Adrar und Air deutlich an ihrem Bewuchs zu erkennen. Die Unterschiede in der Polarisation entstehen im wesentlichen durch den Wassergehalt, so dass Abb. 3.65 im wesentlichen eine Kombination aus Pflanzenbewuchs und Bodenfeuchte darstellt – für die Detaillklassifikation der Vegetation sicherlich weniger geeignet als Kombinationen aus sichtbarem Licht und nahem IR (NDVI,

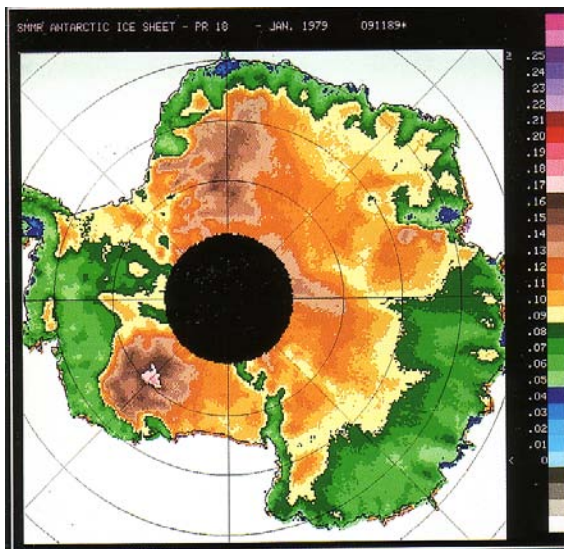


Abbildung 3.66: Polarisationsunterschiede bei 18 GHz beobachtet mit dem Scanning Multi-Channel Radiometer SMMR auf Nimbus-7 über der Antarktis im Januar 1979 [237]

siehe auch Abschn. 3.7.2 und Abb 3.87); unter dem Aspekt der Wüstenbildung auf Grund des betrachteten allgemeineren Kriterium Feuchte bzw. Wassergehalt dagegen eher geeignet.

§ 475 Polarisationsunterschiede bei 18 GHz basieren ebenfalls auf der Existenz von flüssigem Wasser im Bildbereich. Ein Anwendungsbeispiel ist in Abb. 3.66 gezeigt: Polarisationsunterschiede über dem arktischen Eisschild. Blau sind die Bereiche mit einem signifikanten Gehalt an flüssigem Wasser, d.h. auch die Bereiche, in denen im Sommer der Eisschild schmilzt.

§ 476 Das folgende Beispiel illustriert die Vorteile von Mikrowellen besonders gut: Eis lässt sich zwar auch im sichtbaren und im thermischen IR gut nachweisen (siehe z.B. auch Abb. 3.92), jedoch ist die Dynamik des Eises dort nur durch sein saisonales Verschwinden bzw. Auftauchen zu erkennen. Diese Verfahren weisen also nur ein vollständiges Verschwinden der Eisschicht nach. Für die Bedeckung mit Meereis ist dies sinnvoll. Ein Eisschild verändert sich jedoch lange Zeit in seiner Mächtigkeit bis er an den Rändern so weit abgeschmolzen ist, dass dort auch sein zurückweichen zu erkennen ist. Schmelzendes Eis ist jedoch gleich bedeutend mit flüssigem Wasser, so dass die Daten aus Abb. 3.66 einen Hinweis auf die Bereiche geben, in denen der arktische Eisschild zwar taut aber eben noch den darunter liegenden Boden oder Ozean bedeckt. Das Beispiel veranschaulicht auch recht gut, dass zum Verständnis eines Phänomens häufig eine geeignete Kombination von Instrumenten benötigt wird. Dies ist insbesondere beim Design von Missionen zu beachten – wir werden in Kapitel 4 noch einen genaueren Eindruck davon bekommen.

3.4 Aktive Instrumente

§ 477 Aktive Instrumente erzeugen ein elektromagnetisches Signal, beleuchten damit den Untersuchungsgegenstand und zeichnen das reflektierte Signal auf. Aktive Mikrowelleninstrumente erlauben die Messung zusätzlicher Parameter:

- der Laufzeit des Signals vom Satelliten zum Boden und zurück (→ Altimeter).
- der Dopplerverschiebung der Frequenz auf Grund der Bewegung des Satelliten relativ zum Boden.
- die Polarisation des Signals.¹⁹

¹⁹Diese Eigenschaft haben zwar auch passive Mikrowellensensoren, jedoch ist in dem Fall die Polarisation durch die Emission und nicht durch die Reflektion bestimmt.

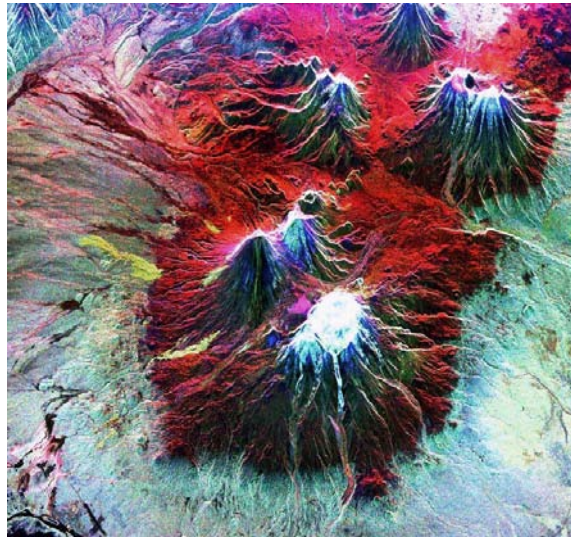


Abbildung 3.67: Kamtschatka vom Space Shuttle, aufgenommen mit SIR-C/X-SAR [622]; zur Farbkodierung siehe § 570

§ 478 Das Paradebeispiel für ein aktives Instrument ist das Radar. Es ist, wie die anderen aktiven Mikrowelleninstrumente, ein lange Zeit vergleichsweise selten auf Satelliten eingesetztes Instrument, da es als aktives Instrument selber Strahlung emittieren muss und damit einen sehr hohen Energiebedarf hat. Radarsatelliten sind früher insbesondere im militärischen Bereich häufig mit kleinen Kernreaktoren ausgestattet gewesen und können so auf Grund der von ihnen emittierten γ -Strahlung leicht identifiziert werden [187]. Die Reaktoren sollen, wenn der Satellit abzusinken beginnt, vom Satelliten getrennt und in eine höhere Umlaufbahn geschossen werden. Diese Trennung funktioniert nicht immer, so dass einige Reaktoren abgestürzt sind (z.B. Kosmos 954 im Januar 1978 über Kanada, Kosmos 1402 im Februar 1983 über dem Indischen Ozean; eine (etwas ältere) Übersicht über Reaktoren im Weltraum gibt [377]). Moderne Radarsatelliten kommen mit Solarzellen aus – es sind nicht nur die Solarzellen effizienter geworden sondern auch die damit bestückten Flächen deutlich größer: zum einen sind die Satelliten selbst wesentlich größer, zum anderen die (Ent-)Falttechniken wesentlich effizienter.

§ 479 Die wichtigsten zivilen Radarinstrumente auf Satelliten sind die SeaSat-1 [479, 571, 645] Instrumente, die Instrumente auf ERS-1 (Earth Resource Satellite) [347] sowie die auf dem Space Shuttle verwendeten SIR-A [572] auf STS-2 [583] und SIR-B Instrumente. Letztere sind auch als Vorstudien für die Entwicklung der modernen Radarsatelliten wie RadarSat [282, 283] oder TerraSat [296, 297] unerlässlich gewesen. Die Raumsonde Magellan [463, 540] ist mit einem Radar zur Kartographie der Venus ausgestattet. Das erste zivile Radar auf einem Satelliten war das SeaSat Instrument, ein SAR (Synthetic Aperture Radar) gestartet am 27. Juni 1978. Ein ziviles SLRAR (Side-Looking Real Aperture Radar [575]) wurde auf Kosmos 1500 [510], gestartet am 28. September 1983, geflogen sowie später auf der Okean-Serie der FSU. Eine Übersicht über SARs im Weltraum gibt Tab. 3.13.

§ 480 Radar basiert auf der Verwendung von Mikrowellen, hat jedoch gegenüber den oben beschriebenen passiven Instrumenten den Vorteil einer höheren räumlichen Auflösung. Abbildung 3.67 zeigt als Beispiel eine Radaraufnahme (SIR-C/X-SAR [574]) Aufnahme von Kamtschatka, aufgenommen vom Space Shuttle [585]. An der Aufnahme wird unmittelbar ein Unterschied zu den mit den älteren Instrumenten gemachten Aufnahmen im sichtbaren deutlich: Radaraufnahmen enthalten Informationen über die dritte Dimension, die Höhe.²⁰

²⁰Die moderne Aufnahme im sichtbaren enthält heute genauso wie die früheren Luftaufnahmen überraschend viel Perspektive und damit Höheninformation. Das wird in den Wolkenkratzern in Abb. 4.1 und 3.102 ebenso deutlich wie z.B. aus dem Relief in Abb. 3.92 und 4.7. Und der für die Stereo-Aufnahmen erforderliche seitliche Blick liefert natürlich auch die Höheninformation.

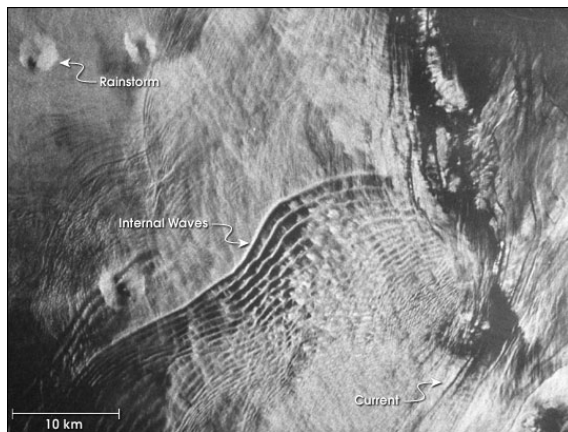


Abbildung 3.68: Kleine Höhenunterschiede werden mit Radar besser erkannt als im optischen – und liefern sehr komplexe Informationen wie diese SeaSat Aufnahme des Golf von Mexiko aus dem Jahre 1978 zeigt [621]

§ 481 Die vom Radar gelieferte Höheninformation ist bei Aufnahmen von ausgedehnten Wasserflächen eher eine Texturinformation. Daraus lassen sich jedoch viele Rückschlüsse ziehen, siehe Abb. 3.68, die ein im optischen arbeitendes Instrument nicht erlauben würde.

§ 482 Mit dem aktiven Instrument kann man außerdem gegenüber einem passiven Instrument zusätzliche Informationen gewinnen. Die zusätzlichen Messgrößen sind dabei die Laufzeit des Signals vom Satelliten zum Boden und zurück, die Dopplerverschiebung der Frequenz aufgrund der relativen Bewegung des Satelliten gegenüber dem Boden und die Polarisation der Strahlung. Mit diesen Informationen lassen sich drei unterschiedliche Typen aktiver Mikrowelleninstrumente konstruieren: Altimeter, Scatterometer und das Synthetic Aperture Radar SAR; das Ground Penetrating Microwave Instrument ist eine weitere, bisher eher auf Flugzeugen oder dem Space Shuttle eingesetzte Version.

3.4.1 Altimeter

§ 483 Das Altimeter ist ein Instrument, das dem Alltagsbegriff von Radar entspricht: so wie ein Radar in der Schiff- oder Luftfahrt dient es der Abstandsbestimmung – mit dem einzigen Unterschied, dass der Radarstrahl nicht horizontal sondern vertikal orientiert ist.

§ 484 Das Altimeter ist also ein Instrument, das aus der Reflektion eines senkrecht nach unten gestrahlten Mikrowellenpulses den Abstand des Satelliten gegenüber dem Boden bestimmt. Derartige Instrumente wurden verwendet auf SkyLab [482], GEOS-3 [521], SeaSat [479, 571] und ERS-1 [347]; heute finden sich Altimeter (auch in der Funktion als Serviceinstrumente) auf verschiedenen Erdfernerkundungssatelliten, z.B. RA-2 [195] auf EnviSat [343] oder das Poseidon-2 Altimeter auf Jason [477]. Für die reine Höhenmessung ist es allerdings nicht erforderlich, mit einem Radar-Altimeter zu arbeiten – hier ist ein Laser-Altimeter ausreichend. LAGEOS [532] war die Umkehrung dieses Prinzips und lebt im LRR des RA-2 Instruments weiter; GLRS [423] ist seine neue Variante.

§ 485 Die wissenschaftliche Anwendung des Altimeters ist eine genaue Bestimmung des Geoids (das ist eine fiktive Äquipotentialfläche der Erde in ungefähr der Höhe der Erdoberfläche, also etwas wie ein globales NormalNull). Besonders interessant sind hier die Ozeane, da deren Oberfläche bzw. die Abweichungen der Meereshöhe von der eines Referenzellipsoids die direktesten Signaturen für die Abweichung des Erdgeoids von diesem Ellipsoid geben. Dazu muss die über einen langen Zeitraum gemittelte Höhe der Meeresoberfläche bestimmt werden (der lange Zeitraum ist erforderlich, da man sonst die Wellenhöhe und die Gezeiten bestimmen würde, nicht aber die mittlere Höhe der Meeresoberfläche). Dazu müssen zwei Größen genau bestimmt werden, (1) die Höhe des Satelliten über der senkrecht darunter liegenden Meeresoberfläche und (2) die genaue Position des Satelliten.

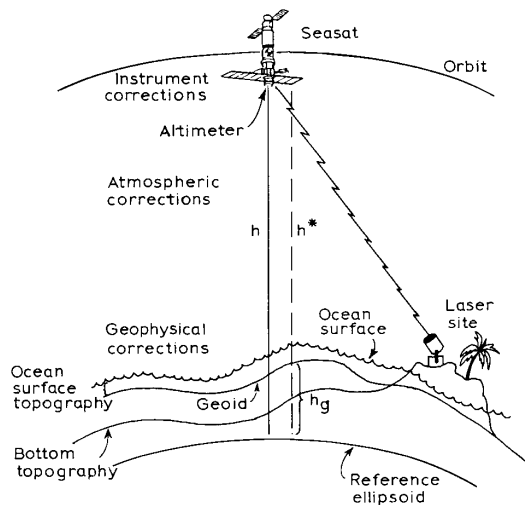


Abbildung 3.69: Funktionsweise des SeaSat-Altimeters [41]

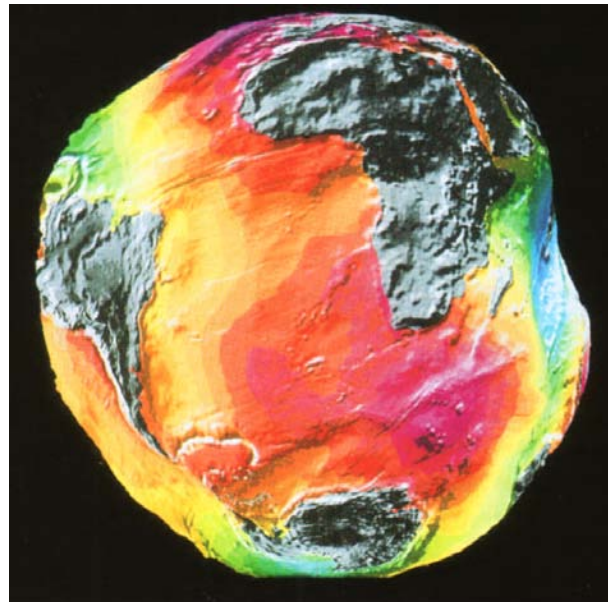


Abbildung 3.70: Geoid: wahre Erdform [83], etwas übertrieben dargestellt

§ 486 Zur Bestimmung der Höhe des Satelliten über der Meeres- oder Landoberfläche sendet das SeaSat-Altimeter kurze Impulse ($3.2 \mu\text{s}$) bei einer Frequenz von 13.5 GHz aus, die Wiederholfrequenz dieser Pulse beträgt 1020 Hz. Das Prinzip dieser Messungen ist in Abb. 3.69 angedeutet. Das Altimeter hat eine Genauigkeit von ± 10 cm in der Bestimmung der Höhe des Geoids. Diese Genauigkeit ergibt sich nicht einfach aus der Laufzeit des Signals, sondern erfordert genaue Korrekturen für (a) den Abstand der Altimeterantenne vom Massenmittelpunkt des Raumfahrzeuges, (b) interne Instrumentungenauigkeiten z.B. durch Signallaufzeiten, (c) den Einfluss der Atmosphäre, (d) Veränderungen im Reflektionsverhalten in Abhängigkeit von der Rauigkeit oder Bewegung der Oberfläche, (e) die Topographie der Ozeanoberfläche durch Zirkulationen, barometrische Effekte und Luftbewegung, (f) Ungenauigkeiten im Referenzgeoid, (g) Gezeiten und (h) zufällige Fehler. Die sich aus der Reflektion des Signals ergebende Höhe wird mit einer Genauigkeit von ± 5 cm vermessen, die Ungenauigkeit aufgrund der oben genannten Abweichungen führt auf den Gesamtfehler von ± 10 cm. Zum Vergleich: vor SeaSat war der Geoid lediglich mit einer Genauigkeit von ± 1 m bekannt.

§ 487 Eine sehr genaue Vermessung des Geoids ist durch den im Juni 1991 gestarteten ERS-1 erfolgt. Die Messgenauigkeit in der Höhe liegt bei wenigen Zentimetern. Für die

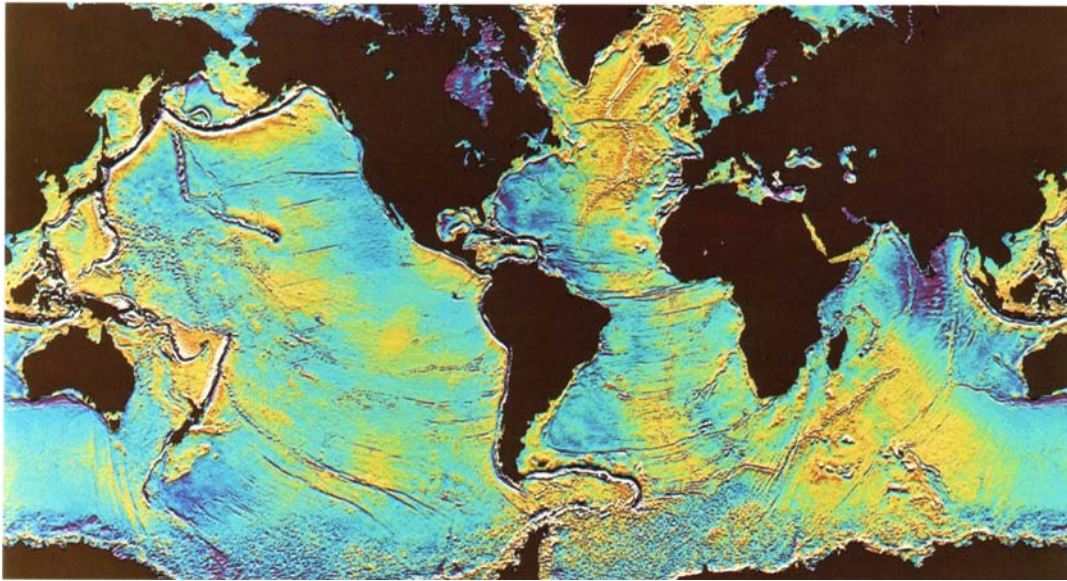


Abbildung 3.71: Sea Floor Mapping: die Form des Ozeanbodens mit Gräben und Kontinenten [33]

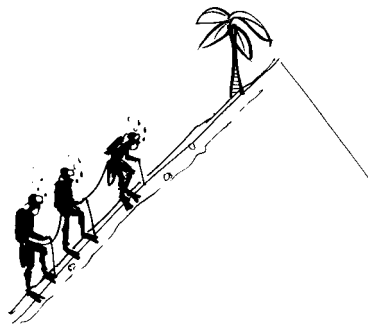


Abbildung 3.72: Sea-Mountain-eering [194]

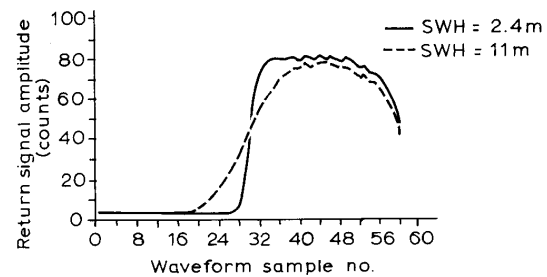
Schwankungen in der Meereshöhe, die wir ja sonst gerne als den absoluten Bezugspunkt für Höhenmessungen (Höhe über NN) angeben, ergeben sich beachtliche Größen. So ragt die Wasserfläche nordöstlich von Australien bis zu 85 m über den Durchschnittswert empor und liegt im nördlichen indischen Ozean bis zu 105 m darunter.

§ 488 Die Ursachen für solche langwelligen Ondulationen in der Form des Geoids sind wahrscheinlich Temperaturschwankungen im flüssigen Erdmantel. Kühler ist er insbesondere in jenen Regionen, wo kontinentale Platten während ihrer Subduktion noch nicht vollständig erwärmt sind. Je kühler das Magma ist, umso größer ist aber auch seine Dichte und damit die Gravitation an dieser Stelle. Alles, was darüber liegt, wird entsprechend stärker angezogen, es bildet sich also eine Delle aus. Umgekehrt bildet sich an den Stellen, wo das Magma sehr heiß ist, eine Beule aus. Das Geoid (Bildmittelpunkt auf den südlichen Atlantik gerichtet) ist in Abb. 3.70 dargestellt.

§ 489 Wie bereits in § 484 angedeutet ist das Altimeter immer noch nicht out. Modernere Experimente als das SeaSat-Altimeter sind auf z.B. TOPEX/Poseidon [478] geflogen, auf dem bereits erwähnten ERS-1 sowie auf Jason-1 [477]. Auf ICESat [423] dagegen fliegt mit GLAS [422] ein Laser-Altimeter.

§ 490 Ein häufig gezeigtes Ergebnis des SeaSat-Instruments ist eine indirekt bestimmte Größe. Die Abweichungen der Meereshöhe von einem Referenzgeoid lassen sich verwenden,

Abbildung 3.73: Form des reflektierten Signals des SeaSat-Altimeters für verschiedene signifikante Wellenhöhen [41]



um daraus Schlüsse über die Topographie des Meeresbodens zu ziehen, d.h. die Höhe der Wasseroberfläche wird in eine Höhenskala für den Meeresboden umgerechnet (sicherlich ein nicht triviales Verfahren, das auf verschiedenen Annahmen beruht). Damit ist eine Darstellung des Reliefs des Ozeanbodens (Sea Floor Mapping) und damit auch der gesamten Erdoberfläche (im Sinne von Erdkruste) möglich., vgl. Abb. 3.71. Diese Darstellung zeigte erstmals direkt die einzelnen Kontinentalplatten und die sich auf Grund der Kontinentaldrift auftuenden Gräben bzw. sich aufwerfenden Gebirgszüge – so ein Marsch über den Meeresboden ist also nicht ganz einfach (siehe Abb. 3.72).

3.4.2 Scatterometer

§ 491 Während die Laufzeit des Signals eines Altimeters eine Information über die Höhe des Satelliten über der Meeresoberfläche gibt, gibt die Form des reflektierten Signal eine Information über die signifikante Wellenhöhe: das ursprünglich emittierte Signal entspricht einem Rechteckimpuls. Wird dieser von einer waagerechten, vollständig glatten Fläche reflektiert, so werden alle Bestandteile gleichzeitig reflektiert und das Signal kommt beim Empfänger als scharfer Sprung an. Ist die Meeresoberfläche dagegen uneben, so trifft ein Teil des Signals auf niedriger liegende Teile als der Rest (der Durchmesser oder die Punktgröße des SeaSat-Mikrowellensignals auf der Wasseroberfläche beträgt zwischen 1.6 km und 12 km), damit ist aber auch seine Laufzeit länger und der Rechteckimpuls wird zu einem kontinuierlichen Anstieg verwischt. Abbildung 3.73 zeigt die Form eines zurückgekehrten Impulses in Abhängigkeit von der signifikanten Wellenhöhe SWH. Zusätzlich zur Bestimmung der Meereshöhe ist auch eine Bestimmung der Windgeschwindigkeit (nur Betrag, nicht die Richtung) über der Wasseroberfläche möglich.

Verständnisfrage 31 Welche physikalische Größe ist mit der signifikanten Wellenhöhe eigentlich gemeint?

§ 492 Die aus der Signalform bestimmte SWH und ihr Zusammenhang mit den Windgeschwindigkeiten wird aus empirischen Zusammenhängen bestimmt. Das Scatterometer wird ähnlich dem Altimeter zur Untersuchung des Zustandes der See verwendet. Statt eines einzelnen Radarpulses wird ein Ensemble von vier Pulsen benutzt. Dadurch ist eine Bestimmung nicht nur des Betrages der Windgeschwindigkeit, sondern auch ihrer Richtung möglich. Abbildung 3.74 zeigt ein Beispiel für die mit Hilfe des Scatterometers bestimmten Windprofile. Details zum Instrument und zum Verfahren finden sich in [41].

§ 493 Auch dieses Verfahren ist nicht völlig befriedigend, da es stets auf empirischen Zusammenhängen zwischen Wind, Meeresoberfläche und Wellen basiert – das Messverfahren wurde vorgeschlagen, weil man irgendwann bei der Verwendung von Radar beobachtet hat, dass die Rückstreuung mit zunehmender Windgeschwindigkeit zunimmt. Dieses rückgestreute Signal ist jedoch nicht eine Reflektion des Ausgangssignals an irgendwelchen Wellenbergen (das müssten schon ziemliche Monster sein) sondern entsteht durch konstruktive Interferenz von aufeinander folgenden Wellen auf der Meeresoberfläche. Dazu muss die Bragg Bedingung

$$\lambda_S \sin \vartheta = \frac{1}{2} n \lambda$$

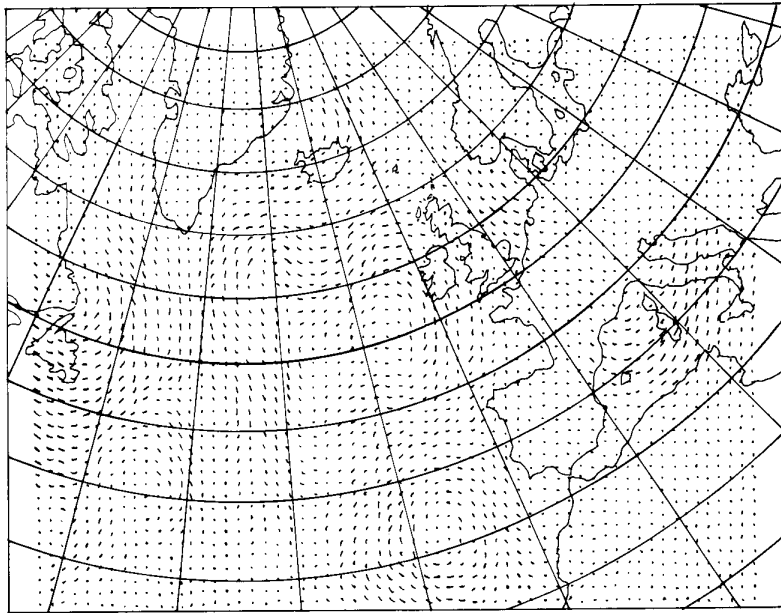


Abbildung 3.74:
Windgeschwindigkeiten
bestimmt mit dem
Scatterometer von
SeaSat [41]

Mission	Launch Date	Spatial Resolution (km)	Swath Width (km)	Frequency GHz (Band)	Polarization	Data Rate (kb/s)	Altitude, Inclination (km/°)	Sensor, Remarks
Skylab	14.5.73	16	180	13.9 (Ku)		5.33	435, 50°	S-193
Seasat	27.6.78	50	500	14.6 (Ku)	VV,HH		800/108°	SASS
Spacelab-1	28.11.83							MRSE, Shuttle
ERS-1	17.7.91	50	500	5.3 (C)	LV		785, 98.5°	AMI in Scat. mode
ERS-2	21.4.95	50	500	5.3 (C)	LV		785/98.5	AMI in Scat. mode
ADEOS	17.8.96	25,50	600/1200	13.99 (Ku)	VV,HH	2.9	797/98.6°	NSCAT
QuikSCAT	19.6.99	50	1800	13.4 (Ku)		40	803/98.6°	SeaWinds
ADEOS-II	2002	50	1800	13.4 (Ku)		20	803, 98.6°	SeaWinds
Coriolis	2003	25	1400	6.8, 10.7, 18.7, 23.8, 37.0 GHz	Circular	5000	830, 98.7°	Windsat
MetOp-1	2005	50	2 x 550	5.255 (C)	VV	60	800, 98.5°	ASCAT
NPOESS	2008							CMIS

Tabelle 3.11: Übersicht über Scatterometer im Erdorbit [134]

mit λ als der Wellenlänge der Mikrowellen, λ_S als der Wellenlänge der Oberflächenwellen, ϑ als dem Einfallswinkel der Strahlung gemessen gegenüber der Vertikalen und n als kleiner ganzen Zahl. Für die niedrigste Ordnung ($n = 1$) ergibt sich bei Wellenlängen der Mikrowellen in der Ordnung von wenigen Zentimetern ein λ_S in der Ordnung von einigen Zentimetern. Das Scatterometer entdeckt damit nicht die großen (mit bloßem Auge sichtbaren) Wellen sondern Kapillarwellen auf der Wasseroberfläche. Das sind jene Wellen, die sich bilden, wenn Wind über eine ganz glatte Pfütze oder einen ebene Teich streicht. Kapillarwellen sind also, im Gegensatz zum Seegang, ein direktes Maß für die Windgeschwindigkeit.

§ 494 Trotz dieses engen Zusammenhangs gehen aber auch in die Interpretation von Scatterometerdaten empirische Zusammenhänge ein. Wie bei der Bestimmung der Windgeschwindigkeit mit Hilfe eines Altimeters werden dabei Vergleichsmessungen vom Satellit von von Schiffen oder Bojen verwendet.

§ 495 Eine modernere Variante des SeaSat-Scatterometers ist SeaWinds geflogen auf QuikSCAT [481], einer schnellen Ersatzmission für NSCAT auf ADEOS. Eine Übersicht über Scatterometer im Erdorbits gibt Tabelle 3.11.

System	Description
GPR (Ground Penetrating Radar) SRI, P.94.1	First airborne tests/studies (ice penetration) were conducted in 1974, GPR first flown in 1993
FOLPEN, SRI, since 1990, P.94	FOLPEN-I and-II are VHF impulse SAR systems with foliage penetration capability
CARABAS, FOA, Sweden, P.49	Penetration of vegetation/foliage and to some extent of the ground surface, since 1992
TOPSAR, JPL (upgrade 1994), P.13.1	Calculation of the differential penetration characteristics of the dual-frequency radar waves for different Earth terrain types
P3/SAR, ERIM/Navy (upgrade 1994), P.82.3	Support of foliage and ground penetration experiments/applications
LARSEN, CCRS, since 1985, P.111	A lidar for the measurement of shallow water depths
LFS, University of Oldenburg, P.116	Lidar for the analysis of the upper sea surface layers, since '93
SHOALS, USACE, 1994, P.184	A lidar for the measurement of shallow water depths
SASAR, U. of Cape Town, since 1996, P.181	The VHF-band of SASAR offers a surface/foliage penetrating capability
PBMR, GSFC/WFF, since 1983, P.160	L-band radiometer for the measurement of soil moisture, etc.
RADIUS, NPO Vega, since 1986, P.171	Microwave radiometer for the measurement of soil moisture, etc.
ESTAR, MIRSL/GSFC, 1988, P.87	L-band radiometer for the measurement of soil moisture and ocean salinity
AIMR, AES, Canada, since 1989, P.8	Microwave radiometer for the measurement of soil moisture and snow depth
PORTOS, CNES, since 1992, P.167	Microwave radiometer for the measurement of soil moisture
MIRAS, ESA, since 1996, P.132	L-band radiometer for the measurement of soil moisture and ocean salinity

Tabelle 3.12: Ground-Penetrating Mikrowelleninstrumente [134]

§ 496 Während das klassische Scatterometer ein aktives Instrument ist, werden gehen die jüngeren Entwicklungen in Richtung passiver Scatterometer wie z.B. WindSat [643] auf Coriolis [508], eine militärische Testversion für den Conical-Scanning Microwave Imager/Sounder CMIS [268] auf NPOESS.²¹ Ferner erscheint es attraktiv, in Zukunft Scatterometer auch zur Niederschlagsmessung einzusetzen, um zu einem besseren Verständnis des globalen Wasserkreislaufs zu kommen.

3.4.3 Ground-Penetrating Mikrowelleninstrumente

§ 497 Ebenfalls aktive Instrumente sind die in den Grund eindringenden Mikrowelleninstrumente. Da die dielektrischen Eigenschaften des Bodens durch die Feuchte bestimmt sind, lässt sich aus der Laufzeit und der Signalform nicht nur die Bodenfeuchte an der Oberfläche sondern auch in größeren Tiefen abschätzen.

§ 498 Tabelle 3.12 gibt einen Überblick über verschiedene Mikrowelleninstrumente, deren Signal bis in mittlere Tiefen in den Boden eindringt und somit eine Bestimmung der Bodenfeuchte erlaubt. Die Instrumente sind im Entwicklungsstadium und werden vom Space Shuttle oder Flugzeug eingesetzt.

3.4.4 SAR Synthetic Aperture Radar

§ 499 Im Gegensatz zu Alti- und Scatterometer erzeugt das eigentliche Radar räumlich aufgelöste Bilder. Der Output ist damit ähnlich dem von optischen Kameras oder Scannern, jedoch hat Radar den Vorteil, Wolken zu durchdringen und auch nachts zu arbeiten – aber um den Preis der hohen Leistungsaufnahme. Das räumliche Auflösungsvermögen ist gegenüber dem passiver Mikrowelleninstrumente deutlich verbessert, siehe z.B. Abb. 3.67 und 3.68. Weitere Beispiele für Radaraufnahmen vom Weltraum aus finden sich z.B. auf der JPL-Radarpage unter [630]; die kommerziellen Missionen zeigen Beispiele unter [282, 283, 296, 373, 397].

²¹NPOESS (National Polar-Orbiting Operational Environmental Satellite System) ist die (geplante) Verschmelzung des zivilen POES-Programms [640] der NOAA und des Defense Meteorological Satellite Program DMSP [368]. Die Idee ist auf [639] skizziert, einige kritische Kommentare gibt [675]. Zur Zeit übt man erst einmal mit dem NPOESS Preparatory Project NPP [425, 612] – auch, um nicht zwischenzeitlich ganz ohne POES-artige Satelliten dazustehen. Letzteres ist ein Problem ähnlich dem LandSat LCDM.

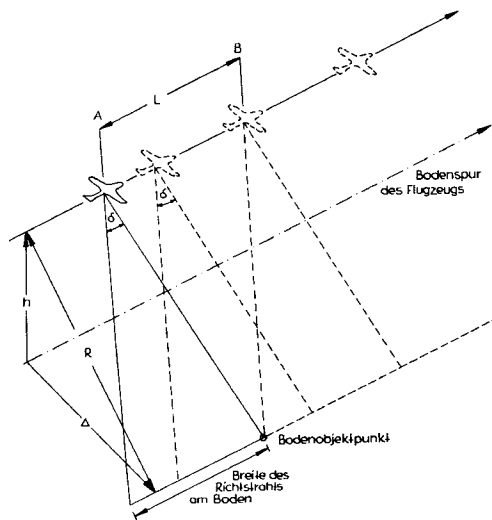


Abbildung 3.75: Veranschaulichung der Formierung der synthetischen Arraylänge eines SAR [28]

§ 500 Konventionelles Radar erfordert die Verwendung einer großen Antenne. Da diese in der Regel²² nicht auf einem Satelliten nicht mitgeführt werden kann, verwendet man ein Synthetic Aperture Radar (SAR): die große Antenne wird dabei aus der Verschiebung einer kleinen Antenne durch die Eigenbewegung des Satelliten zusammengesetzt. Synthetic Aperture Radar wird nicht nur von Satelliten sondern ebenso von Flugzeugen und vom Shuttle aus verwendet. Abbildung 3.75 zeigt dazu am Beispiel eines Flugzeuges, wie durch die Bewegung der Antenne eine größere Array- oder Antennenlänge erzeugt wird.

§ 501 SAR verwendet relativ kleine Antennen mit einem weiten Richtstrahl. Wie in Abb. 3.75 angedeutet, ist dieser Strahl zur Seite gerichtet. Dadurch werden vom bewegten Sensor vom gleichen Bodenobjekt eine Vielzahl von Radarechos aus verschiedenen Positionen empfangen. Sowohl die Amplitude als auch die Phase des zurückkommenden Signals werden für einen Zeitraum T gespeichert. Dieser Zeitraum T wird definiert als die Zeit, in der die beobachteten Objekte innerhalb eines bestimmten Abstandes R von der Antenne liegen. Die während dieser Zeit zurückgelegte Flugstrecke (in Abb. 3.75 AB) entspricht dann der Länge L des synthetischen Arrays. Mit l als der Länge der Antenne ist diese dann gegeben zu [28]

$$L \approx R \cdot \frac{\lambda}{l} .$$

§ 502 Die auf Grund der Relativbewegung zwischen Antenne und Objekt verursachte Dopplerverschiebung des zurückkommenden Signals wird mit der Frequenz und Phasenlage eines stabilen Oszillators verglichen. Das Interferenzsignal kann entweder in Form eines Hologramms auf Film oder auf Magnetband aufgezeichnet werden, die Wiederherstellung des Bildes erfolgt mit Hilfe kohärenter optischer Prozessoren (schnell aber weniger genau) oder elektronischer Rechenanlagen (langsam aber bessere Resultate). Im so bearbeiteten Radarbild ergibt sich somit ein Objektpunkt aus der kohärenten Summierung einer Vielzahl individueller Radarechos, wobei sich positive und negative Dopplerverschiebungen aufheben. Insofern ist ein Radarbild in seiner Entstehung überhaupt nicht mit den anderen Imaging-Instrumenten vergleichbar.

§ 503 Bei der Rücktransformation der Radardaten wird die Dopplerverschiebung stets so interpretiert, dass sich die Relativbewegung zwischen Satellit und Objekt aus der Bewegung des Satelliten über dem Erdboden ergibt. Für Berge, Brücken, Gebäude und andere ortsfeste Strukturen ist dies korrekt. Wird der Radarpuls dagegen von einem bewegten Objekt (Schiff,

²²Ausnahmen bestätigen die Regel: Kosmos 1500 [510] und einige andere Satelliten des Okeanos-Programms flogen mit einem Real Aperture Radar RAR mit einer Antennenlänge von 11.1 m, was zu einer Bodenauflösung von ca. 2 km in Flugrichtung und ca. 1 km senkrecht dazu geführt hat.

Abbildung 3.76: SAR: reflektiertes Signal in Abhängigkeit von den Geländeeigenschaften [209]

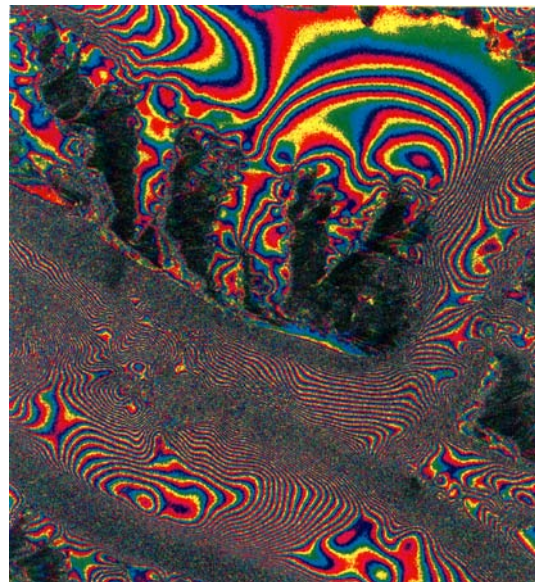
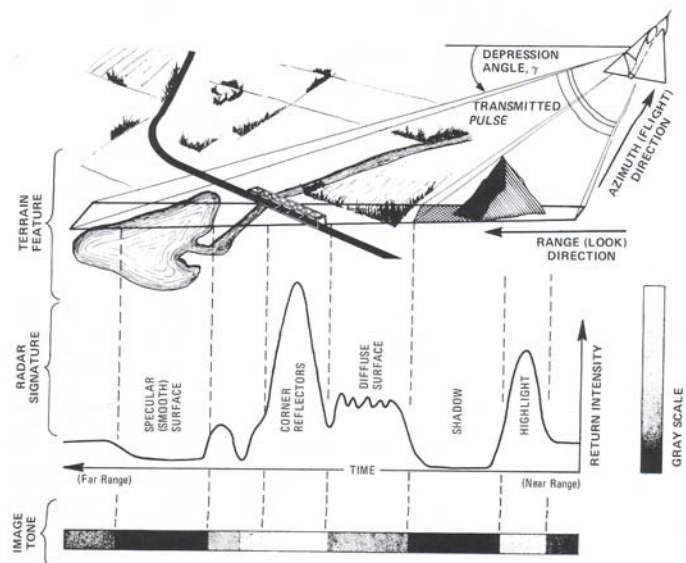


Abbildung 3.77: Interferogramm des Bagley Icefield, Alaska, und seiner Zuflüsse während einer Surge des Bering Glacier [627]

Zug) reflektiert, so wird die Dopplerverschiebung wieder nur als Folge der Satellitenbewegung interpretiert. Dadurch wird das reflektierende Objekt auf einen falschen Ort zurück gerechnet: ein Schiff fährt neben seinem Wellenfächer im Kielwasser, ein Zug fährt neben den Gleisen.

§ 504 Abbildung 3.76 fasst einige Eigenschaften bei der Abbildung mit Radar zusammen: da das Aufnahmeverfahren auf einem zur Seite geneigten Strahl basiert, entstehen hinter erhöhten Geländemerkmale Schattenbereiche über die keine Information gewonnen werden können. Der Helligkeitswert des reflektierten Radarpulses hängt von der Geländestruktur ab: eckige geometrische Strukturen, also auch viele vom Menschen errichtete Strukturen, reflektieren die Puls stark, erzeugen also einen großen Helligkeitswert. An diffusen Oberflächen (z.B. Vegetation) wird ein Teil des Strahls auf den Sender zurück gestreut, es entstehen mittlere Helligkeitswerte. Glatte Oberflächen, z.B. Gewässer) reflektieren den Radarstrahl nicht in Richtung des Senders, diese Flächen erscheinen dunkel. Die Idee ist bereits vom scatterometer bekannt.

§ 505 Radar wird, basierend auf der Vorstellung von Schiffs- oder Flugverkehrsradar, leicht

Mission	Launch Date	Spatial Resolution (m)	Swath Width (km)	Freq. GHz (Band)	Polarization	Look Angle	Data Rate Mbit/s	Altitude, Inclina. (km, [°])	Instrument, Remarks
Seasat	27.6.78	25	100	1.28 (L)	HH	20°	110	800,108°	SAR
SIR-A	12.11.81	40	50	1.28 (L)	HH	47°	N/A	260, 38°	SAR, Shuttle
SIR-B	5.10.84	25	30	1.28 (L)	HH	15-60°	34	225,57°	SAR, Shuttle
Kosmos 1870	25.7.87	25-30	20-35	3.125(S)	HH	25-60°		270, 72°	SAR
Almaz-1	31.3.91	13-20	2 x 172	3.125(S)	HH	25-60°	100	350, 72°	SAR
ERS-1	17.7.91	30	100	5.3 (C)	VV	23°	105	785, 98,5°	AMI, 3 modes
JERS-1	11.2.92	18	75	1.27 (L)	HH	35.21°	60	568, 97°	SAR
ERS-2	21.4.94	30	100	5.3 (C)	VV	23°	105	785, 98,5°	AMI, 3 modes
SIR-C/X-SAR	9.4.94 30.9.94	15-25	30-100	1.28, (L) 5.3, (C) 9.6 (X)	VV,HH VV,HH HH	15-55°	46/Ch.	225, 57°	L-SAR, Scan X-SAR, Scan X-SAR, Scan
RADAR-SAT-1	4.11.95	25-100 (12x9)	100-170	5.3 (C)	HH	20-60°	110	800, 98,6°	SAR, ScanSAR
Priroda	23.4.96	50	50	1.28, (L) 3.28 (S)	HH, VV	35°	16	400, 52°	SAR Travers
SRTM	11. - 22. 2. 2000	30 30	225 50	5.3 (C) 9.6 (X)	VV,HH HH	45° 52°	180 90	225, 57°	C-RADAR X-RADAR Interferometry
Envisat	2001	<30	100	5.33 (C)	Polarimetric	15-45°	100	800, 98,5°	ASAR, ScanSAR
RADAR-SAT-2	2003	3-100	10 - 500	5.3 (C)	Polarimetric	10-50°	105	800, 98,6°	SAR, ScanSAR
ALOS	2003	10	70	1.27 (L)	HH or VV	9-60°	240	700, 98°	PALSAR, ScanSAR
Condor-E	2004	1-5 5-22	20-150 10-20	3.13 (S)	HH HH,VV	20-55°	61	600,	SAR-10
COSMO-SkyMed	2004	1, 3-15, 30, 100	10, 40 100-200	9.6 (X)	HH, VV,	20-60°	2 x 150	620	SAR-2000
TerraSAR-X1 & -L1	2006 2006	1 - 15	55--100	9.6 (X) 1.28 (L)	Polarimetric	20-55°	300	660, 98°	XSAR, LSAR

Tabelle 3.13: Übersicht über SARs auf Raumfahrzeugen [134]

mit Abstandsmessung in Verbindung gebracht. Vom Gedanken des Altimeters her könnte man daher vermuten, dass Radar automatisch ein dreidimensionales Bild liefert. Das tut Radar, aber leider nur im Prinzip. In der einfachsten Rückrechnung entsteht ein zweidimensionales Abbild. Die Bestimmung von Höhen und damit eine Annäherung an eine 3D-Darstellung wird erst durch genaue Analyse des Interferograms möglich. Abbildung 3.77 zeigt als Beispiel das Bagley Icefield [152], aufgenommen mit dem ERS-1 SAR.²³

§ 506 Eine Übersicht über SARs auf Raumfahrzeugen gibt Tab. 3.13. Das Bodenaufklärungsvermögen liegt bei den etwas älteren Instrumenten im Bereich von 25 bis 40 m, ist also mit dem der Multispektralkameras und -scanner aus der entsprechenden Zeit ohne weiteres zu vergleichen. Bei neueren Instrumenten wie TerraSAR-X (siehe Abschn. 4.6) beträgt das Bodenaufklärungsvermögen im Spot-Modus 1 m; das entspricht auch wieder dem Bodenaufklärungsvermögen der kommerziellen optischen Instrumente wie Ikonos, SPOT oder QuickBird – zumindest dem panchromatischen Mode dieser Instrumente.

§ 507 Allerdings fehlen beim Radar die Spektralinformationen, die gerade das LandSat TM Instrument so interessant und wichtig machen. Damit ist zwar beim Radar der Vorteil der Unempfindlichkeit gegenüber Bewölkung gegeben, dieser muss aber gegen die Nachteile des fehlenden spektralen Auflösungsvermögens und des hohen Energiebedarfs abgewogen werden. Haupteinsatzgebiet von Radarsatelliten war daher lange Zeit fast ausschließlich die Ozeanüberwachung. Diese erfolgt zum einem im militärischen Bereich (Aufenthalt und Bewegungsrichtung von Schiffen), zum anderen unter verschiedenen geophysikalischen oder meteorologischen Fragestellungen. Für die Fernerkundung der landbedeckten Erdoberfläche eignen sich die im optischen Bereich arbeitenden Instrumente eher.

²³Die Abbildung erinnert an die Verwendung von polarisiertem Licht zur Untersuchung von Spannungen in mechanischen Bauteilen. Das verleitet zu der Interpretation, dass ein Gletscher ein unter Spannung stehendes mechanisches Bauteil ist: irgendwie drückt von oben und zieht nach unten und an den Seiten hakt es. Ein Gletscher steht zwar unter derartigen Spannungen; diese sind jedoch nicht direkt für das Interferogramm verantwortlich.

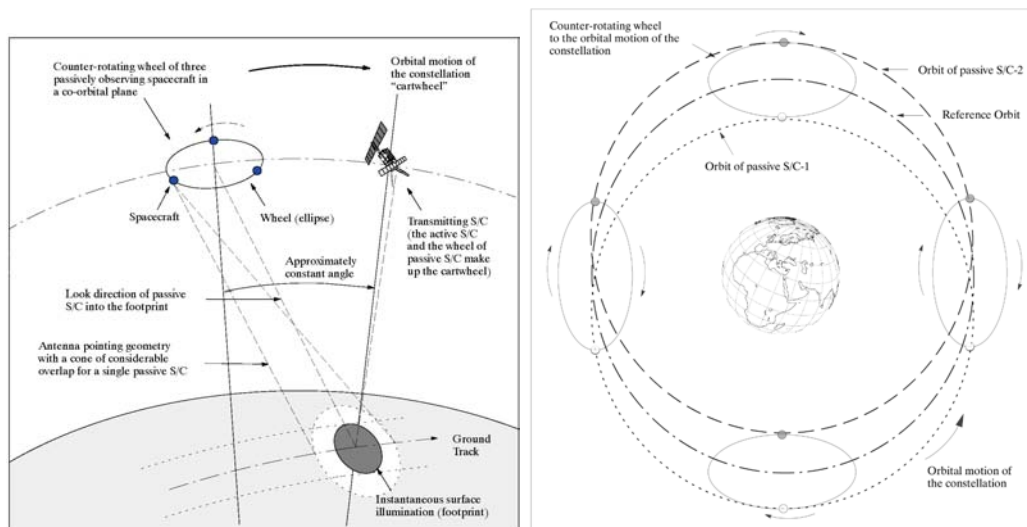


Abbildung 3.78: Purzelbäume im Weltraum: SAR verteilt auf einen Hauptsatelliten (mit dem aktiven Instrument) und drei passiven Antennensatelliten in einer Cartwheel-Konfiguration (*links*) und deren Orbits (*rechts*) [134]

§ 508 Ein bildgebendes Radarinstrument kann aber genauso wie ein Scanner im optischen Bereich zur Bestimmung der Flächennutzung oder anderer Oberflächenmerkmale eingesetzt werden; Abb. 3.84 zeigt ein Beispiel dafür, dass Radar auch mal einen Blick unter die Oberfläche werfen kann. Statt der Wellenlängeninformation wird dabei die Polarisation verwendet – ein Verfahren, das wir mit geringer Bodenauflösung bereits im Zusammenhang mit dem passiven Mikrowelleninstrument kennen gelernt haben.

§ 509 Konventionellerweise wird die große Apertur des SAR aus der Bewegung des Antennenträgers (Satellit, Space Shuttle oder Flugzeug) erzeugt, d.h. Sende- und Empfangsantenne sind eins. Alternativ kann man aber auch beide trennen und ein anderes Bewegungsmuster einführen. Abbildung 3.78 zeigt dazu die so genannte Cartwheel Konfiguration: der eigentliche Satellit ist die aktive Komponente, der eine bestimmtes Feld auf dem Boden beleuchtet. Eine Gruppe von drei kleineren passiven Raumfahrzeugen bildet die elliptische Empfangsantenne, die das gleiche Blickfeld im Auge hat. Die Herausforderung besteht darin, die Antennensatelliten in Bahnen zu bringen derart, dass die von ihnen gebildete elliptische Antenne erhalten bleibt und nicht auseinander driftet. Der rechte Teil von Abb. 3.78 deutet eine geeignete Konfiguration an. Angedacht ist eine derartige Carthwheel-Konfiguration z.B. für den TerraSAR-L [697].

§ 510 Aktive Mikrowelleninstrumente werden nicht nur zur Erkundung der Erde verwendet. Auf der Raumsonde Magellan [540, 463] z.B. sind mehrere aktive Mikrowelleninstrumente zur Kartierung der Venus eingesetzt. Ähnlich SeaSat ist Magellan mit verschiedenen Instrumenten ausgestattet: Hauptbestandteil ist das SAR, das eine globale Karte der Venus mit einer Bodenauflösung von 150 m erstellt hat. Dazu kommt ein Altimeter mit einer Auflösung von 30 m zur Bestimmung des Gravitationsfeldes und ein Radiometer mit einer Auflösung von 2 K. Diese Instrumente erlauben ein Verständnis der auf der Venus wirkenden geologischen Prozesse und damit auch eine Überprüfung unserer Vorstellungen über die Entwicklung eines Planeten. Insbesondere die Vergleiche zwischen verschiedenen erdähnlichen Planeten (z.B. Venus und Erde) sind hier von Bedeutung. Die Magellan-Ergebnisse sind in zwei Sonderbänden des JGR veröffentlicht (Journal of Geophysical Reserach 97, E8 und 97, E10) sowie in einer Folge von drei Artikeln in Sterne und Weltraum [112]. Auch Cassini-Huygens [147, 454] und der Mars Reconnaissance Orbiter MRO [497, 464, 406] haben Radar (mit unterschiedlichen Zielsetzungen und entsprechend unterschiedlichen Spezifikationen) an Bord.

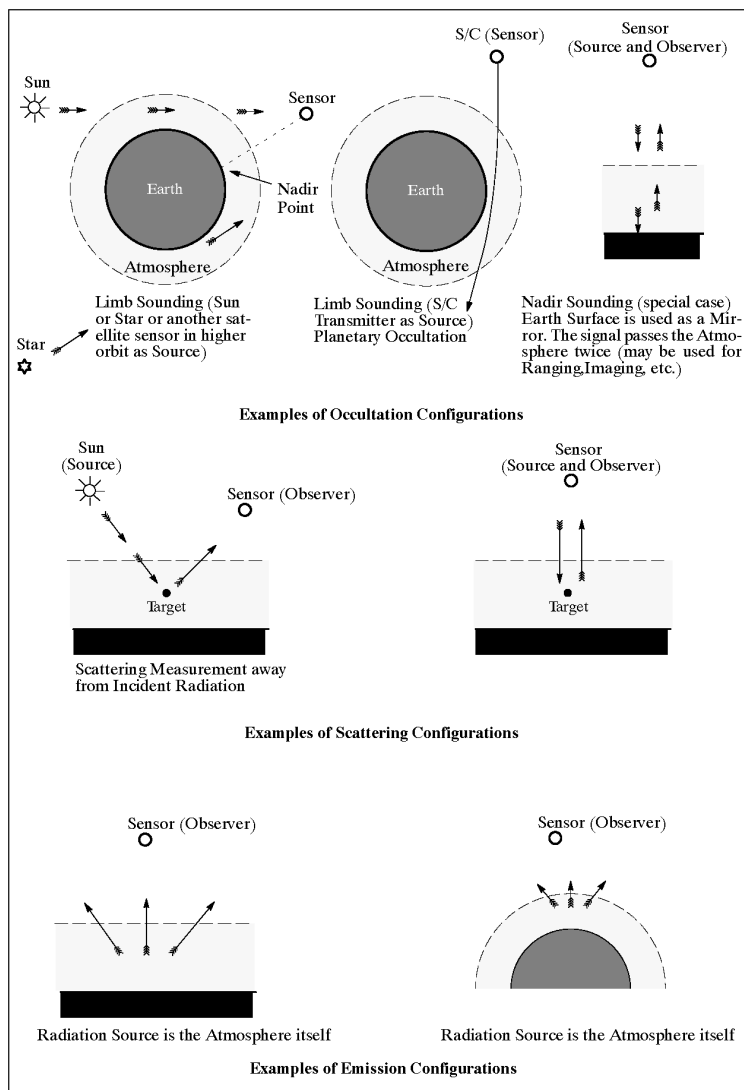


Abbildung 3.79: Konfigurationen für Sounder [134]: Limb Viewing (*oben*), Streuung (*Mitte*) und Emission (*unten*)

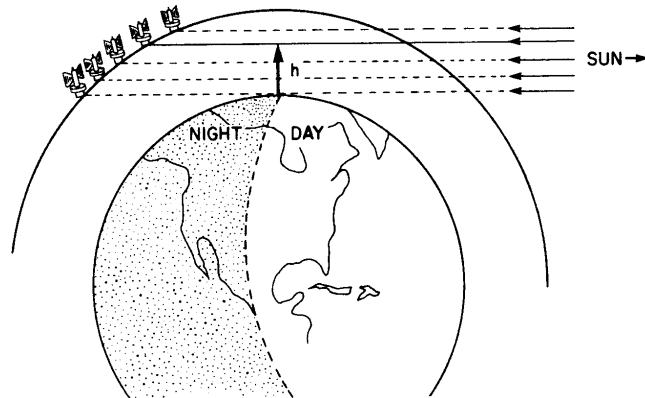
3.5 Sounder

§ 511 In der Erdfernerkundung sind Sounder die Instrumente, die das sichtbar machen, was die Kartographen und Militärs am liebsten übersehen möchten: die Atmosphäre. Sounder können in unterschiedlichen Geometrien arbeiten (siehe auch Abb. 3.79), ebenso in unterschiedlichen Wellenlängen(bereichen). Während die Imaging-Instrumente Daten in Abhängigkeit von der bzw. den horizontalen Koordinaten liefern, misst ein Sounder die Daten in Abhängigkeit von der Vertikalkoordinaten. Ein Sounder erstellt also ein Höhenprofil.

3.5.1 Prinzip

§ 512 Wir haben bisher im sichtbaren Bereich nur Imaging-Instrumente betrachtet, d.h. Instrumente, die uns das Äquivalent zu einer Photographie erzeugen - die zweidimensionale Darstellung eines Gebietes. Für einige Anwendungen, insbesondere zur Untersuchung der Atmosphäre, sind diese Bilder wenig hilfreich. Zur Messung von Spurengasen, Aerosolen oder der Ozonkonzentration bedient man sich eines Sounders. Das generelle Merkmal eines Sounders ist, dass die Information über die Verteilung einer bestimmten Eigenschaft (z.B. Konzentration von CO_2) in Abhängigkeit von der Höhe bestimmt wird. Eine gute Übersicht

Abbildung 3.80: Sonnenuntergang aus der Sicht des Sounders SAM (Stratospheric Aerosol Measurement) auf Nimbus 7. Das Instrument beginnt, die Sonnenscheibe auf einer tangentialen Höhe h von ungefähr 350 km zu scannen und folgt der Sonne, bis sie untergegangen ist. Dadurch werden unterschiedliche Schichten der Atmosphäre nacheinander abgetastet [99]



über verschiedene Typen von Soundern (allerdings mit Beispielen von klassischen, d.h. etwas älteren Soundern) geben Houghton et al. [99].

§ 513 Sounder arbeiten nach drei verschiedenen Prinzipien: Okkultation (Limb-Viewing), Streuung und Emission, siehe Abb. 3.79. Die frühesten Sounder wurden zur Messung von Aerosolen mit Hilfe des Limb-Viewing eingesetzt. Als nächste Frage rückte die Bestimmung der Ozonkonzentration in den Vordergrund; als Messverfahren wurde die (Rück-)Streuung verwendet. Mit zunehmender Empfindlichkeit der Instrumente lässt sich auch die Messung der Emission von Spurenbestandteilen vornehmen. Moderne Sounder kombinieren Verfahren und untersuchen neben Aerosolen und Ozon auch die Spurengaskonzentrationen.

§ 514 Von den drei Instrumententypen sind die Okkultationsinstrumente am einfachsten zu verstehen; ihr Prinzip ist in Abb. 3.80 dargestellt. Die Absorption des Lichts von der Sonne oder einem Stern lässt Rückschlüsse auf die Zusammensetzung der Atmosphäre in Abhängigkeit von der Höhe zu, in der das Licht die Atmosphäre durchsetzt hat. Dabei muss auf die Länge des in der Atmosphäre zurückgelegten Weges korrigiert werden. Vorteil der Methode sind die langen Wege des Lichts durch die Atmosphäre, so dass sich selbst schwache Emissions- und Absorptionssignale nachweisen lassen. Außerdem ist die Höhenmessung im Gegensatz zu den vertikal arbeitenden Geräten direkt.²⁴ Der Nachteil des Verfahrens ist die Erfordernis einer externen Lichtquelle (Sonne oder Stern), wodurch das Verfahren auf bestimmte Zeiten und Raumbereiche festgelegt ist. Allerdings ist das Verfahren in der Troposphäre nicht anwendbar (Orographie).

§ 515 Einer der oben genannten Vorteile, der lange Lichtweg, macht die Auswertung der Messungen aufwendig. Jeder Strahl liefert das Integral des Absorptionskoeffizienten entlang des Lichtweges (line of sight). Das Messprinzip ist damit ähnlich dem einer Röntgenaufnahme: auch dort wird für jeden Pixel des Bildes das Integral des Abschwächungskoeffizienten entlang des Sehstrahls gebildet. Die Information über den Abschwächungskoeffizienten in jedem einzelnen Volumenelement lässt sich daraus mit Hilfe einer eher rechenintensiven Rücktransformation (z.B. Radon-Transformation) oder durch Überlagerungsverfahren rekonstruieren; allgemeines zu derartigen Transformationen in [94, 174, 192, 250], die bei einem Instrument/Datensatz verwendeten Verfahren können über die Zitate für die einzelnen Instrumentbeschreibungen gefunden werden.

§ 516 Welche Spurenstoffe oder Aerosole sich mit Hilfe eines Sounders untersuchen lassen, hängen von den verwendeten Wellenlängen ab. Das bereits erwähnte SAM (Stratospheric

²⁴Vertikal arbeitende Geräte betrachten häufig nur die totale Säule (wie die totale Ozonsäule in Abb. 1.4): die gesamte Atmosphäre ist ein Filter, dessen Absorptionskoeffizient bestimmt wird. Oder anders formuliert: die Absorption wird entlang des Sehstrahls integriert. Die totale (Ozon-)säule ist auch die Größe, die man aus der Messung vom Erdboden bestimmen würde. Falls ungewöhnliche Linien oder Linienveränderungen einen Hinweis auf das Druckniveau geben, lässt sich aus diesen auch mit Hilfe eines Modells der atmosphärischen Schichtung eine indirekte Höheninformation gewinnen.

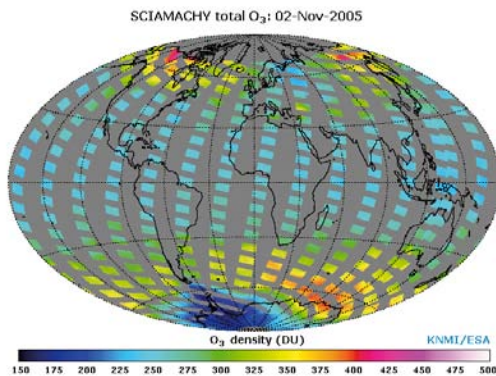


Abbildung 3.81: Datenoutput der von Sciamachy während eines Tages gemessenen totalen Ozonsäule [75]

Aerosol Measurement) auf Nimbus 7 z.B. betrachtet das Sonnenlicht in einem Frequenzband, das um $1 \mu\text{m}$ zentriert ist. In diesem Bereich ist die Absorption durch die normalen atmosphärische Bestandteile vernachlässigbar. Jede Abschwächung des Sonnenlichtes muss daher durch Streuung an Aerosolen oder Rayleigh-Streuung an (größeren) Molekülen entstanden sein. Die Messung von Ozonkonzentrationen erfolgt ebenfalls mit Limb-Viewing Soundern. Hier werden die Absorptionseigenschaften des Ozons im UV-Bereich ausgenutzt. Die Instrumente arbeiten meistens in mehreren engen Frequenzbereichen innerhalb des Wellenlängenbereiches von 0.25 bis $0.34 \mu\text{m}$.

§ 517 Sounder arbeiten also nicht exklusiv im sichtbaren Licht; im Gegenteil, der nicht-sichtbare Bereich ist der Bereich, in dem die Atmosphäre stark streut oder absorbiert (wie oben diskutiert) oder auch stark emittiert. OCO [467] z.B. misst Spurengase durch deren Emission im Infrarotbereich. Hier ergibt sich die Information über die Höhe aus der Abhängigkeit der Emissionsbanden vom Druck, d.h. für diese Instrumente ist ein exzellentes spektrales Auflösungsvermögen erforderlich.

§ 518 Eine andere Methode des Sounding beruht auf der Streuung. Die Hauptanwendung dieser Methode ist z.B. der Nachweis von Regen. Wenn ein Radarpuls durch ein Regengebiet geht, so werden die Radarechos proportional zur Rückstreuung der Impulse an den Regentropfen reflektiert, wobei tiefer in die Wolke eindringende Pulse später reflektiert werden. Auf diese Weise lässt sich ein vertikales Profil der Intensität des Niederschlages erzeugen. Eine weitere Anwendung von Streuinstrumenten ist die Messung der Ozonkonzentration mit Hilfe der Rückstreuung der solaren UV-Strahlung (TOMS [327], BUV = Backscattered UV) [324].

§ 519 Wie bei den immer genauer werdenden Instrumenten im sichtbaren Bereich gilt auch bei den Soundern: es dauert lange, bis das globale Bild erstellt ist. Abbildung 3.81 zeigt als Beispiel die von Sciamachy (siehe auch § 671) auf Envisat bestimmte totale Ozonsäule für alle während eines Tages erfolgten Messungen. In der Verteilung der Messwerte lässt sich die Bodenspur wieder erkennen. Allerdings wird nicht kontinuierlich entlang der Bodenspur gemessen sondern immer nur in Intervallen: das Instrument wechselt zwischen den verschiedenen Messmodi.

§ 520 Abbildung 3.82 zeigt Beispiele für die von einigen modernen Soundern wie SCIAMACHY [325], MIPAS [318], AMAS, MSU, MERIS [316] und CERES [399] betrachteten Wellenlängenbereiche sowie die atmosphärische Transmission und den gesamten (Erdboden plus Atmosphäre) aufwärts gerichteten Strahlungsstrom. Eine Übersicht über Dounder gibt auch das World data Center for Remote sensing of the Atmosphere des DLR [303].

3.5.2 Anwendungsbeispiele

Treibhauswirksame Spurengase und Ozon

§ 521 Eng mit dem Treibhauseffekt und einer möglichen globalen Erwärmung verknüpft

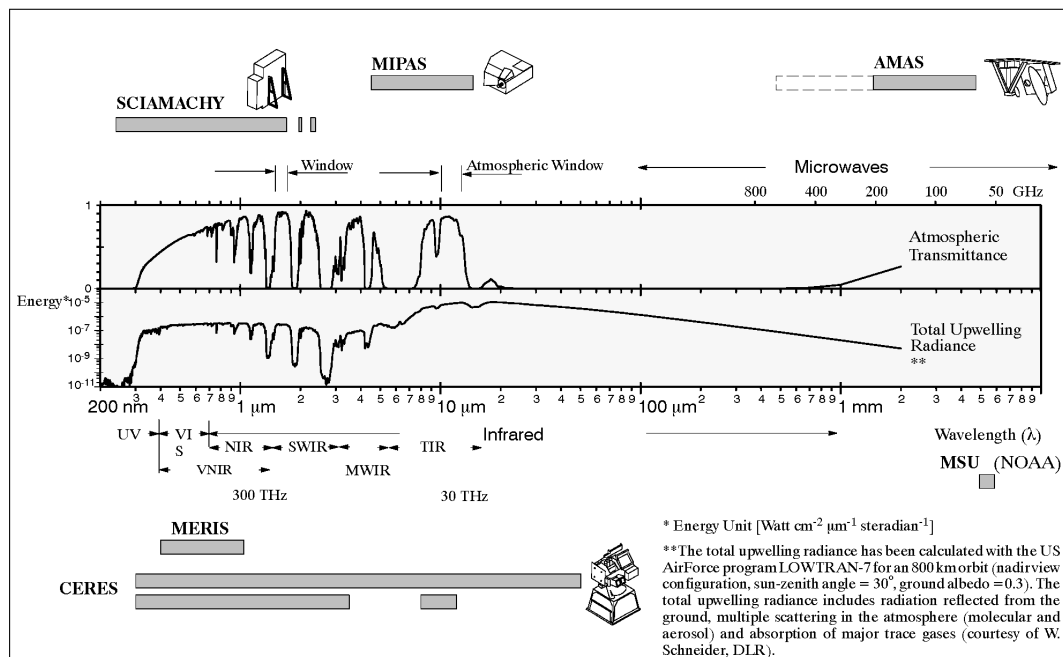


Abbildung 3.82: Einige moderne Sounder und die von ihnen betrachteten Wellenlängenbereiche zusammen mit der atmosphärischen Transmission und dem gesamten aufwärts gerichteten Strahlungsstrom [134]

sind die atmosphärischen Spurengase, hier natürlich insbesondere die treibhauswirksamen Spurengase. Messnetze für Spurengase müssten bei einer Beschränkung auf Beobachtungen vom Boden aus im Prinzip ähnlich dem Netz der Wetterstationen installiert werden. Allerdings stellt sich dort, genauso wie auch bei den Wetterstationen, das Problem, wie diese Messungen auch über den Ozeanen und in anderen schwer zugänglichen Bereichen in einem halbwegs homogenen zeitlichen und räumlichen Gitter erfolgen können. Die Verteilungen, Konzentrationen, Quellen und Senken sowie die Lebensdauer dieser Spurengase in der Atmosphäre sind einige der zu untersuchenden Fragen. Alle diese Parameter werden mit möglichst großer Genauigkeit benötigt, wenn man ein Klimamodell realitätsnah gestalten und auf der Basis dieses Modells Voraussagen über mögliche Klimaänderungen machen will.

§ 522 Der größte Teil der anthropogenen Verschmutzung spielt sich in der Troposphäre ab. Hier finden die Wettervorgänge der Atmosphäre statt, hier ist der vertikale und horizontale Austausch kräftig, auch findet ein Austausch mit Meer-, Land- und Eisflächen statt. Die Tropopause als obere Grenze der Troposphäre ist durch eine deutliche Temperaturinversion markiert (siehe auch Abb. 3.1). Diese verhindert den Austausch von Gasen mit der darüberliegenden Stratosphäre nahezu vollständig. Lediglich im Bereich der Jetströme kann ein jahreszeitenabhängiger Austausch zwischen diesen Schichten stattfinden (zur Struktur, Chemie und Physik der Atmosphäre siehe z.B. [76, 100, 101, 204]). Allerdings kann z.B. bei Vulkanexplosionen die aufsteigende Asche- und Gaswolke so mächtig und heiß sein, dass sie bis in die Stratosphäre hinein ragt und dort einen Eintrag an Aerosolen und Schwefeloxid bewirkt. Diese Wolke kann sich global verteilen (z.B. Mt. Pinatobu) und baut sich nur langsam wieder ab – ein dankbares Feld für Satellitenbeobachtungen.

§ 523 Die wichtigsten klimawirksamen Spurengase sind Kohlendioxid, Methan, verschiedene Fluorchlorkohlenwasserstoffe und Stickoxide. Die Konzentrationen, Wachstumsraten und atmosphärischen Lebensdauern dieser Gase sind in Tabelle 3.14 zusammen gefasst; aktuellere und größere Mengen von Spurengasen umfassende tabellen finden Sie z.B. in den IPCC-Reports [105, 106]. Aber wie bestimmt man solche Daten? Wie weist man Spurengase nach?

	CO ₂ [ppm]	CH ₄ [ppm]	CFC-11 [ppt]	CFC-12 [ppt]	N ₂ O [ppb]
1750–1800	280	0.8	0	0	288
1990	353	1.72	280	484	310
jährl. Zunahme	1.8	0.015	9.5	17	0.8
Lebensdauer [a]	50–200	10	65	130	150

Tabelle 3.14: Klimawirksame Spurengase, deren Konzentration stark von menschlicher Aktivität beeinflusst wird

Die meisten diese Gase sind nicht sichtbar, d.h. eine Satellitenaufnahme im sichtbaren Bereich hilft bei ihrer Identifikation nicht.

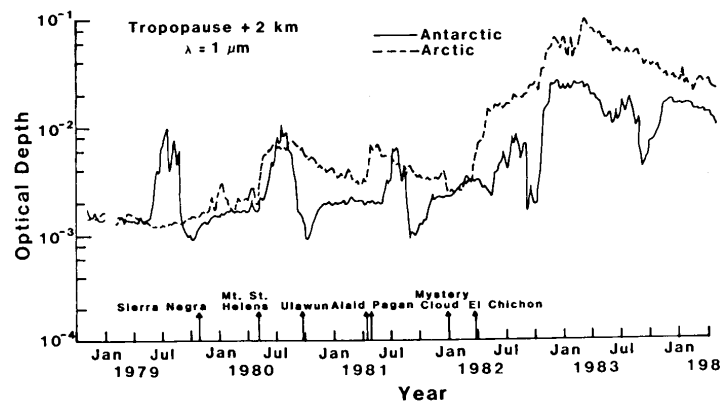
§ 524 Spurengas-, ebenso wie Aerosolkonzentrationen werden im allgemeinen mit Sounding-Instrumenten gemessen. In Abschn. 3.5.1 hatten wir das Verfahren kurz am Beispiel des SAM II (Stratospheric Aerosol Measurement) erläutert. SAM II ist ein Okkultationsinstrument, bei dem die Atmosphäre in dünne horizontale Streifen zerlegt wird. Nachteil eines Okkultationsinstrumentes ist, dass es nur oberhalb einer Höhe von einigen Kilometern arbeiten kann, da bei geringerer Höhe z.B. Gebirge in den Lichtweg treten. Diese Instrumente eignen sich also eher für das Studium der Stratosphäre und der obersten Schichten der Troposphäre, weniger aber für den im Zusammenhang mit dem Spurengaseintrag interessanteren Bereich der unteren und mittleren Troposphäre.

§ 525 Für Messungen in der Troposphäre benötigt man daher Instrumente, die senkrecht oder schräg nach unten blicken und die Rückstreuung oder Emission messen. Die Messungen werden dadurch verkompliziert, dass die Stratosphäre vom Instrument ebenfalls gesehen wird und dass Wolken die Messungen stark beeinflussen können. Die Möglichkeit, troposphärische Aerosole und Spurengase von Satelliten aus zu messen, ist erst in den letzten Jahren erfolgreich demonstriert worden [89]. Eine Übersicht darüber, welche Instrumente sich für die Messung troposphärischer Aerosole und Spurengase eignen, geben [134, 150]. Die meisten der Instrumente wurden, wie üblich, in der Erprobungs- und Entwicklungsphase auf dem Space Shuttle eingesetzt. In der aktuellsten Satellitengeneration (Mission to Planet Earth, siehe Abschn. 4.8) sind diese Instrumente jedoch bereits Standard, SCIAMACHY (siehe § 671) auf dem 2002 gestarteten EnviSat (siehe Abschn. 4.4) ist ein Beispiel, OCO ein weiteres.

§ 526 Ein typisches Beispiel für diese Entwicklung vom Shuttle- zum Satelliteninstrument ist MAPS (Measurement of Air Pollution from Satellites [546, 545]) – eines der daraus für eine Satellitenmission abgeleiteten Instrumente ist MOPITT [322] auf Terra [617]. MAPS ist ein Gasfilter-Korrelationsradiometer, das 1981 und 1984 auf Shuttle-Flügen eingesetzt wurde. MAPS misst die vom System Erde-Atmosphäre emittierte Strahlung. Diese Strahlung wird mit der Referenzstrahlung einer geschwärzten Aluminiumplatte verglichen, die nicht durch atmosphärische Einflüsse verändert ist. Drei Detektoren messen die Strahlung des Erde-Atmosphäre-Systems und der Referenzplatte, wobei die Strahlung vor jedem Detektor einen gasgefüllten Hohlraum durchsetzen muss, der es erlaubt, die Messungen jeweils auf einen bestimmten Höhenbereich in der Atmosphäre zu beziehen [176, 199]. Korrigiert man diese Daten gegen die Beeinflussung durch Kohlendioxid, Stickoxide, Ozon, Wasserdampf und Wolken, so ist dieses Instrument am empfindlichsten gegenüber Veränderungen in der Kohlenmonoxid-Konzentration im Höhenbereich zwischen 3 und 8 km, d.h. in der mittleren Troposphäre. Andere Korrekturen und Füllgase erlauben die Untersuchung anderer Spurengase (daher unterscheiden sich die Erläuterungen im NSSDC Master Catalog [505] für die einzelnen Shuttle-Einsätze von MAPS) – allerdings natürlich nur so lange, wie nicht die darüber liegenden Atmosphärenschichten in den entsprechenden Wellenlängenbereichen stärker emittieren.

§ 527 Die Weiterentwicklung von MAPS soll TRACER (Tropospheric Radiometer for Atmospheric Chemistry and Environmental Research) sein. TRACER wird in der Lage sein, sowohl Kohlenmonoxid als auch Methan zu messen. Messungen sollen möglich sein für die

Abbildung 3.83: Stratosphärische Aerosol Messungen (SAM II) der optischen Tiefe als einem Maß für die Abschwächung der einfallenden solaren Strahlung in der Arktis und Antarktis [41]. Die Pfeile deuten größere Vulkanausbrüche an



atmosphärische Grenzschicht in 0 bis 3 km Höhe und für die darüberliegende freie Troposphäre. Das Interesse am Kohlenmonoxid erklärt sich dadurch, dass sich CO als ein gutes Näherungsmaß für die troposphärische Ozonkonzentration verwenden lässt (d.h. das durch den Menschen zusätzlich verursachte Ozon in Bodennähe, das zu den sommerlichen Ozonwarnungen führt). Harris [89] zeigt Beispiele für die Kohlenmonoxid- und Ozonmessungen mit MAPS; ein Beispiel für eine CO-Messung mit AIRS auf Aqua ist in Abb. 4.10 gegeben.

§ 528 Eine direkte Messung der troposphärischen Ozonkonzentration ist auf diese Weise kaum möglich, da der größte Teil des Gesamt ozons in der Stratosphäre liegt, d.h. jeder Satellit würde im wesentlichen das stratosphärische Ozon sehen. Allerdings gibt es eine indirekte Möglichkeit, das troposphärische Ozon als Differenz aus der Gesamt ozonsäule und dem stratosphärischen Ozon zu bestimmen. TOMS (Total Ozon Mapping Spectrometer [327]) misst seit 1979 täglich und global den Gesamt ozon gehalt der Atmosphäre (d.h. die Summe aus dem troposphärischen und dem stratosphärischen Ozon) – TOMS hat auch zuverlässig die Daten für den linken Teil von Abb. 1.4 geliefert.

§ 529 TOMS arbeitet nach dem Prinzip der zurückgestreuten UV-Strahlung (BUV, backscattered UV [324]) und ist das Instrument, auf dessen Daten die Informationen über das antarktische Ozonloch beruhen, vgl. Abb. 1.4. Während in hohen Breiten die Ozonkonzentration sehr variabel ist (was sich auch im saisonalen Auftreten des Ozonloches zeigt), ist in den Tropen bis hin zu mittleren Breiten die stratosphärische Ozonkonzentration praktisch konstant, d.h. in mittleren und niedrigen Breiten geben die Schwankungen in der Gesamt ozonkonzentration gleichzeitig die Schwankungen im troposphärischen Ozon wieder.

§ 530 Die Verwendung von Satellitendaten hat hier, wie auch in vielen anderen Bereichen der Erdfernerkundung wieder zwei Vorteile, (a) die kontinuierliche Messung und (b) die Messung auch über entlegenen Gegenden. Ob wir ohne Satellitenmessungen bereits soviel über das antarktische Ozonloch und insbesondere dessen saisonale Variabilität wüssten, ist zweifelhaft. Ohne kontinuierliche Messungen wäre es wahrscheinlich kaum möglich gewesen, diese saisonale Abhängigkeit zu entdecken. Eine nicht ganz aktuelle aber dennoch die wesentlichen und auch heute noch gültigen Aspekte umfassende Beschreibung der TOMS-Beobachtungen findet sich in Schoeberl [215].

§ 531 Auch zeigen die durch Satelliten ermöglichten globalen und zeitkontinuierlichen Beobachtungen der verschiedenen Spurengase, dass Luftverschmutzung von städtischen/industriellen ebenso wie aus landwirtschaftlichen Aktivitäten nicht nur ein lokales Problem ist, sondern dass sich die eingetragenen Schadstoffe bis in die entlegendsten Bereiche der Erde ausgedehnt haben [76, 77, 207].

Vulkane

§ 532 Die Warnung vor Vulkanausbrüchen ist z.B. auch für den Luftverkehr wichtig, da schon häufiger Flugzeuge, die in die Staubwolke eines Vulkans gerieten, durch den Ausfall

eines oder mehrerer Triebwerke zur Notlandung gezwungen waren (nicht mehr ganz aktuell hatte Anfang Oktober 2004 gerade mal wieder der Mt. St. Helens ein Überflugverbot). Interessant sind diese Staubwolken auch aufgrund ihrer Fähigkeit, bis in die Stratosphäre vorzudringen. Hier bewirken sie eine Abschwächung der einfallenden solaren Strahlung. Außer den direkten Informationen über die Wolke aus den Imaging-Daten werden hier zum genaueren Studium, insbesondere auch zur Untersuchung der Zusammensetzung der Wolke sowie der Abschwächung der einfallenden solaren Strahlung, Sounder-Daten verwendet.

§ **533** Abbildung 3.83 zeigt ein Beispiel für die Messungen des SAM II. Die optische Tiefe ist ein Maß für die Schwächung der einfallenden solaren Strahlung.²⁵ Nach den größeren Vulkaneruptionen kommt es in der Arktis zu Erhöhungen der optischen Tiefe. Die jährlichen Peaks in der Antarktis dagegen sind nicht durch Vulkaneruptionen bedingt sondern entstehen im Zusammenhang mit den im antarktischen Winter geschlossenen Zirkulationssystemen. Während der Ausbruch des Mount St. Helens bei seinem Ausbruch 1980 nur ein Signal in der Arktis erzeugt (relativ hohe nördliche Breite des Vulkans!), hat sich die Staubwolke des El Chichon global über beide Hemisphären verteilt.

Klima und Wolken

§ **534** Im Zusammenhang mit der Anwendung von Satelliten scheinen Wolken ein triviales Thema zu sein. Selbstverständlich kann man Satelliten zur Untersuchung von Wolken verwenden, das wird uns ja in jeder Wettervorhersage anschaulich anhand der MeteoSat-Bilder demonstriert. Und wo eine Wolke ist, da kann es auch regnen. Insgesamt klingt das sehr einfach. Bei einer genaueren Untersuchung geht es jedoch um das Verständnis der Einflüsse von Wolken auf unsere Umwelt, d.h. auf Menge und Eigenschaften des Niederschlages einerseits und auf die Bedeutung der Wolken für das Klima andererseits.

§ **535** Die Bedeutung von Wolken als Lieferant für Niederschläge ist offensichtlich. Die wichtigsten Stichworte umfassen dabei die Bedeutung von Aerosolen als Kondensationskeime für Hydrometeore (Wassertröpfchen) und die Reinigung der Atmosphäre durch das Auswaschen von Aerosolen und eines Teiles der Spurengase. Dieses Auswaschen der Spurengase bewirkt gleichzeitig eine Veränderung der Chemie des Niederschlagswassers (Stichwort: saurer Regen). Wird bei der Auflösung der Wolke kein bis auf den Boden reichender Niederschlag erzeugt, so entfällt der Auswascheffekt der Hydrometeore, stattdessen werden Aerosole und Schadstoffe in der Atmosphäre vertikal ebenso wie horizontal umgelagert.²⁶

§ **536** Wolken erzeugen aber nicht nur Niederschlag, sie tragen auch zu einer Modifikation des Strahlungstransports in der Erdatmosphäre bei und sind damit ein wichtiger Bestandteil in Klimamodellierungen. Ihr Einfluss auf den Strahlungshaushalt ist insbesondere im Zusammenhang mit dem anthropogen verstärkten Treibhauseffekt teilweise kontrovers diskutiert worden: eine Erwärmung des Erdbodens, z.B. als Folge eines Anstiegs des CO₂-Gehalts, würde zu einer zusätzlichen Verdunstung und Wolkenbildung führen. Dabei würden sowohl der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre als auch der Wolkenwassergehalt zunehmen. Welche Auswirkungen sich daraus für den Strahlungstransport ergeben, hängt davon ab, welcher Anteil des Wasserdampfes in den Flüssigwassergehalt von Wolken überführt wurde, von der Tröpfchengröße in diesen Wolken und von der Höhe der Wolken in der Atmosphäre.

§ **537** Nach momentanem Stand geht man davon aus, dass tief liegende Wolken einen abkühlenden Effekt haben, da sie die globale Albedo erhöhen (d.h. mehr einfallende solare Strahlung in den Weltraum zurück reflektieren), dagegen nur eine relativ geringe zusätzliche Absorption der von der Erde emittierten Infrarotstrahlung bewirken. Hohe Wolken dagegen lassen die einfallende solare Strahlung ungestört passieren, absorbieren aber zusätzlich von

²⁵Eine optische Tiefe von 1 bedeutet, dass die einfallende Strahlung in dieser Tiefe um einen Faktor $1/e$ abgeschwächt ist. Der begriff der optischen Tiefe ist im Strahlungstransport allgemein gebräuchlich, d.h. bei Sternatmosphären genauso wie in diesem beispiel bei der Erdatmosphäre.

²⁶Dies ist ein typisches Beispiel für einen Satz von messgrößen, der sich zwar vom Satelliten aus bestimmen lässt, nicht jedoch von Bodenstationen.

der Erde emittierte Infrarotstrahlung und führen damit zu einer Erwärmung. Die Bedeutung von Wolken für Niederschlag und Strahlungstransport kann sicherlich nicht getrennt betrachtet werden. Zwischen beiden Phänomenen gibt es Verbindungen, z.B. greifen die Aerosole einerseits selbst in den Strahlungstransport ein, sind andererseits für die Bildung von Wolken unerlässlich, werden aber auch durch Niederschlag ausgewaschen.

§ 538 Wollen wir die Bedeutung und Wechselwirkung von Wolken mit der Atmosphäre im Hinblick auf Niederschlagsbildung ebenso wie auf die Beeinflussung des Strahlungstransports in einem Modell beschreiben, so benötigen wir (a) eine gewisse Zahl an Messgrößen, die uns den Zustand der Atmosphäre in Abhängigkeit von der Zeit und von den dreidimensionalen Raumkoordinaten beschreiben, und (b) physikalische und chemische Gesetzmäßigkeiten, die die Wechselwirkungen der Größen untereinander beschreiben. Ein Teil der verknüpfenden Gesetze wird durch mikrophysikalischen Untersuchungen geliefert (Bildung von Hydrometeoren und deren Aufnahme von Spurengasen und Aerosolen). Einige der anderen Beobachtungsgrößen lassen sich durch Satellitenbeobachtungen bestimmen.

§ 539 Wollen wir eine Wolke verstehen, so benötigen wir als Minimaldatensatz u.a. die folgenden Messgrößen:

- die Evapotranspiration des betrachteten Gebietes, d.h. ein Maß für die Fähigkeit der Erdoberfläche, Wasserdampf an die Atmosphäre abzugeben.
- den Feuchtigkeitsgehalt des betrachteten Gebietes als ein rückwirkendes Maß für über dem Gebiet niedergegangene Niederschläge (vgl. auch die Diskussion im Zusammenhang mit der Schneebedeckung in Abschn. 3.7.3) ebenso wie als ein Maß für die mögliche Verdunstung aus diesem Gebiet.
- den H₂O-Gehalt der Atmosphäre, der sich zusammensetzt aus dem Wasserdampfgehalt der Atmosphäre ebenso wie dem Flüssigwassergehalt der Wolken. Die Unterscheidung zwischen Wasserdampfgehalt und Flüssigwassergehalt ist wichtig, da beide unterschiedliche Einflüsse auf den Strahlungstransport haben.
- die mittlere Tröpfchengröße in den Wolken (oder besser eine Verteilung der Tröpfchengrößen), da die Tröpfchengröße Auswirkungen auf den Strahlungstransport hat. Entsprechende Informationen müssen auch für die feste Phase vorliegen, d.h. Schnee, Eiskristalle und Hagelkörner.
- allgemeine Informationen über die Atmosphäre wie Schichtung, vertikale Luftbewegungen, Druck, Temperatur, Dichte, Frontensysteme.
- der Gehalt an Aerosolen (inkl. Größenverteilung und Zusammensetzung) in der Atmosphäre, da diese als Kondensationskeime zur Tröpfchenbildung beitragen.
- der Gehalt an Spurengasen in der Atmosphäre, da diese selbst den Strahlungstransport beeinflussen können und in die Chemie der Hydrometeore eingreifen.
- die räumliche (horizontal und vertikal!) und (jahres)zeitliche Verteilung dieser Parameter.

§ 540 Die Gesetze bzw. empirischen Regeln, die eine Verknüpfung dieser Meßgrößen im Wolkenmodell beschreiben sollen, umfassen u.a.

- die Kondensation von Hydrometeoren in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen wie Übersättigung, Temperatur sowie Vorhandensein, Größenspektrum und Art von Aerosolen.
- das Wachstum von Hydrometeoren in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen.
- die Umlagerung bzw. das Auswaschen von Spurengasen und Aerosolen durch diese Hydrometeore.
- die Chemie der gasförmigen und in Hydrometeoren gelösten bzw. an diesen angelagerten atmosphärischen Bestandteile sowie deren mögliche Rückwirkung auf die Wechselwirkung der Hydrometeore mit ihrer Umgebung, z.B. durch Veränderung des pH-Wertes eines Hydrometeors.
- die Dynamik innerhalb der Wolke, die sowohl die Bildung bzw. Auflösung von Hydrometeoren als auch deren Wechselwirkung mit der Umgebung bestimmt.

- die Dynamik der Atmosphäre insgesamt (vertikale Luftbewegung, Schichtung, erzwungene und freie Konvektion) und die sich daraus ergebende Wechselwirkung zwischen der Luftmasse in der Wolke und der umgebenden Atmosphäre mit ungesättigter Luft.
- die spektralen Absorptions-, Emissions- und Reflektionseigenschaften von Wasserdampf, Wassertröpfchen, Schnee, Eis und Hagel in Abhängigkeit von den Eigenschaften (insbesondere der Größe) der Hydrometeore.
- die spektralen Absorptionseigenschaften der anderen atmosphärischen Bestandteile, insbesondere der Aerosole und Spurengase.

§ 541 Ein Teil dieser Gesetzmäßigkeiten (insbesondere die oberen vier) lassen sich durch mikrophysikalische Untersuchungen bestimmen, die anderen durch Beobachtungen in der Atmosphäre direkt bzw. indirekt durch Satelliten.

§ 542 Im Zusammenhang mit der Modellierung von Wolken haben wir bereits einige wichtige Input-Parameter kennen gelernt. Als letzter dieser Input-Parameter wurde die räumliche und zeitliche Verteilung der Größen erwähnt. Darin zeigt sich, dass eine in-situ Bestimmung der Parameter nicht mit vertretbarem Aufwand durchgeführt werden kann. Stattdessen erscheint es sinnvoll, auf Satellitenbeobachtungen zurückzugreifen. Zu nennen sind hier die üblichen Imaging Instrumente, die im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums arbeiten und im thermischen Infrarot.

§ 543 Mit diesen Instrumenten lassen sich Wolkenbedeckungen ebenso wie Wolkenalbedos bestimmen. Durch die Verwendung des Infrarotkanals (bzw. eines im thermischen Infrarot arbeitenden Instruments) lässt sich die Temperatur der Wolkenobergrenze bestimmen und damit durch Vergleich mit der Standardatmosphäre oder besser noch durch Bezug auf ein Sounding Instrument oder einen geeigneten Radiosondenaufstieg die Höhe der Wolkenoberkante.

§ 544 Damit erhalten wir Informationen über die Bereiche, in denen sich Wolken bilden, die Bewegung dieser Wolken in der Atmosphäre (dient auch der indirekten Messung von Windgeschwindigkeiten in größeren Höhen) und die Auflösung dieser Wolken durch Niederschlag oder Verdunstung. Diese Beobachtungsgrößen entsprechen also dem Output (bzw. einem Teil-Output) eines Wolkenmodells: sie zeigen uns Wolkenbildung und -auflösung und den Transport von Hydrometeoren und darin enthaltenen atmosphärischen Bestandteilen an.

§ 545 Ein Output-Parameter, der in diesen Beobachtungen noch nicht enthalten ist, ist der Niederschlag. Will man diesen nicht auf der Basis des Netzes von Beobachtungsstationen bestimmen (z.B. um eine feinere räumliche Auflösung zu erhalten, um auch sehr lokale Niederschlagsgebiete zu erfassen, oder mit dem Ziel der besseren Erfassung auch ausgedehnter (Wasser-)Flächen ohne dichtes Netz an Beobachtungsstationen), so bieten sich auch hier Möglichkeiten der Fernerkundung an: zum einen die Verwendung von Wetterradar, zum anderen die Verwendung von Satellitenbeobachtungen im Mikrowellenbereich.

§ 546 Auch die Input-Parameter lassen sich größtenteils mit Hilfe von Satelliteninstrumenten bestimmen. Dazu werden Kombinationen einer Vielzahl von Imaging und Sounding Instrumenten benötigt, die in verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums messen. Als Beispiel für die Komplexität der Fragestellungen aber auch für die Möglichkeiten der Untersuchung, die sich durch eine geschickte Kombination von Instrumenten ergeben können, sei hier nur der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre erwähnt. Die Strahlung im $6.7 \mu\text{m}$ Band ist stark durch die Absorption durch Wasserdampf und die Temperaturverteilung in der Atmosphäre bestimmt. Um daraus die Wasserdampfverteilung zu bestimmen, muss also gleichzeitig eine Temperaturverteilung bestimmt werden, z.B. durch einen Radiosondenaufstieg oder ein entsprechendes Sounding Instrument.

§ 547 Weiter oben hatten wir Aerosole und Spurengase als weitere Input-Parameter kennen gelernt. Deren Vertikalprofile lassen sich ebenfalls mit Sounding Instrumenten bestimmen. Schwieriger dagegen wird es wieder bei der Bestimmung von mittleren Tröpfchengrößen in

den Wolken. Hier ist noch zu überprüfen, ob geschickte Kombinationen vieler Beobachtungen (insbesondere die Verwendung der spektralen Reflektions- und Emissionsvermögen) es erlauben, zumindest grobe Mittelwerte für den oberen Bereich der Wolke anzugeben. Für die Bestimmung des gesamten Flüssigwassergehaltes in Wolken (also eine Summation über die einzelnen Tröpfchen) deutet sich die Möglichkeit einer Kombination von Daten im sichtbaren, infraroten und Mikrowellenbereich an. Das Verfahren ist bisher durch Kombination von Radiosonden- und Satellitendaten überprüft worden, sollte aber aufgrund der verbesserten Instrumentierung der neueren Satellitentypen auch mit Hilfe der Satellitendaten alleine durchgeführt werden können.

§ 548 Ein derartiges Wolkenmodell sollte übrigens nicht alleine als Selbstzweck zur Beschreibung einer Wolke gesehen werden, sondern ist als ein Bestandteil eines wesentlich größeren und komplexeren Klimamodells zu sehen.

3.6 Wunschzettel der 1990er: Mission to Planet Earth

§ 549 In den 90er Jahren hat die NASA (im wesentlichen zur Rechtfertigung ihrer Existenz und der damit verbundenen Kosten, ansonsten aber eher halbherzig) eine internationale Kampagne Mission to Planet Earth oder Earth Observing System [10, 611, 411] aus der Taufe gehoben, die eine vollständige Untersuchung der Erde inklusive der Atmosphäre zum Ziel hat. Da Klimaforschung und -politik im Vergleich zum bemannten Marsflug natürlich völlig irrelevant ist, hat Bush Junior die entsprechenden Pläne der NASA den Realitäten angepasst; wir werden in Abschn. 4.8 auf den aktuellen Stand eingehen.

§ 550 Die Fragestellungen dieser Mission zum Planeten Erde waren ehrgeizig (und sind es auch immer noch); sie sollen umfassen u.a. den hydrologischen Zyklus (Verdunstung, Niederschlag, Transport von Wasserdampf, Wolken), die ozeanische und atmosphärische Zirkulation (mit besonderer Berücksichtigung der Oberflächenwinde), die atmosphärische Zusammensetzung (z.B. Wasserdampf, Wolken und Aerosole), eine globale Beobachtung der troposphärischen Chemie, die Untersuchung der Stratosphäre (Ozon, Chemie und Wind), die Strahlungsbilanz und Oberflächentemperaturen sowie die Temperatur der Meeresoberfläche und die damit verbundenen Windsysteme. Entsprechend werden auch Instrumente mit Fähigkeiten benötigt, die weit über die bisher vorgestellten Universalisten hinaus gehen.

§ 551 Die verschiedenen Instrumente sollen aber nicht nur zur Untersuchung der Atmosphäre verwendet werden. Andere Fragestellungen beschäftigen sich mit biologischer Aktivität und Ökosystemen, dem Vorkommen von Mineralien und Pflanzenarten für Geologie, Land- und Forstwirtschaft, der Oberflächenmineralogie, der Glaziologie und der Entstehung und möglichen Vorhersage von Erdbeben. Diese verschiedenen Messziele sollen durch eine Vielzahl von auf verschiedene Satelliten verteilte Instrumente untersucht werden.

§ 552 Viele der für diese Mission geplanten oder teilweise auch schon gebauten Instrumente sind in ihren Möglichkeiten den bisher betrachteten Instrumenten bei weitem überlegen. Einige von ihnen seien hier kurz vorgestellt, um einen Einblick in ihre Möglichkeiten (und teilweise auch Zielsetzungen) zu geben.

§ 553 Das High-Resolution Imaging Spectrometer HIRIS [48, 72, 277] soll die detaillierte und genau lokalisierte Messung geologischer, biologischer und physikalischer Prozesse vornehmen. Dazu sind gefordert eine spektrale Auflösung von 200 Kanälen im Spektralbereich zwischen 0.4 und 2.5 μm (sichtbares Licht bis nahes Infrarot) und ein Bodenauflösungsvermögen von 30 m bei einem Blickfeld von 30 km. Die 200 Spektralkanäle machen beim Kehrbesen ein entsprechend großes 2D-CCD-Array erforderlich. Die relativ geringe Bodenauflösung ist auch eine Folge des guten spektralen Auflösungsvermögens: die einfallenden Photonen werden auf eine große Zahl von Spektralkanälen verteilt; im Vergleich zu LandSat auf mehr als die 30fache Zahl.

§ 554 Das High-Resolution Imaging Spectrometer HRIS [24] ist HIRIS ähnlich und dient dem remote sensing von Land- und Küstenbereichen. Dazu gehört die Kartierung der geologischen Strukturen und der Vegetation. Anwendungsziel ist ein Überblick über landwirtschaftliche, geologische und Wald-Ressourcen. Der Spektralbereich umfasst wie bei HIRIS den Bereich von 0.4 bis 2.5 μm . Die spektrale Auflösung ist besser als 20 nm, jedoch können nur 10 Spektralbänder für jedes Bild ausgelesen werden. Insofern verschafft HIRIS einen Überblick (z.B. Vegetation oder Gestein), HRIS gestattet dann durch selektive Verwendung der für die jeweilige Gattung interessanten Spektralbänder eine genauere Bestimmung. Die Bodenaufklärung liegt zwischen 20 und 50 m, das Blickfeld beträgt zwischen 20 und 60 km.

§ 555 Das Medium Resolution Imaging Spectrometer MERIS [316, 344, 349] ist ein Nachfolger des Coastal Zone Color Scanners CZCS und hat die Hauptaufgabe, die Farbe des Ozeans zu bestimmen, woraus sich u.a. auf den Planktongehalt zurückschließen lässt (wichtig nicht nur als Maß für die Bioproduktivität sondern auch für den CO_2 -Kreislauf). Dazu können 9 von 60 Spektralbändern im Bereich von 0.4 bis 1.04 μm ausgewählt werden. Das Bodenaufklärungsvermögen beträgt 500 m (Ozeane sind groß und durchmischen sich relativ schnell), die Breite des Blickfelds beträgt zwischen 1000 und 1500 km. MERIS fliegt auf EnviSat, siehe auch Abschn. 4.4.

§ 556 Das Moderate-Resolution Imaging Spectrometer: Tilt MODIS-T und Nadir MODIS-N dient der Messung der Landvegetation und Geologie, der Ozeanoberflächentemperatur und Farbe, und von atmosphärischen Aerosolen und Wolken. Der Spektralbereich von 0.4 bis 1.04 μm ist in 64 Bänder eingeteilt.

§ 557 MODIS [321, 502] und HIRIS dienen im wesentlichen dem Verständnis bio-geochemischer Zyklen, des hydrologischen Zyklus, geologischer Prozesse und langzeitlicher Klimavariationen. Aufgrund der feinen Spektralaufklärung können die Instrumente Gruppen von Organismen identifizieren und damit die komplexen Muster von Ökosystemen und deren Veränderungen auf einer globalen Skala aufzeichnen. Aufgrund seiner besseren räumlichen Auflösung ist HIRIS gleichsam das Zoom-Objektiv von MODIS. MODIS fliegt auf Terra [617] (ehemals EOS-AM) und Aqua [413] (ehemals EOS-PM).

§ 558 Das Intermediate and Thermal Infrared Radiometer ITIR soll hochaufgelöste Bilder im nahen und thermischen Infrarot im Spektralbereich von 0.85 bis 11.7 μm erzeugen. Das räumliche Aufklärungsvermögen beträgt je nach Wellenlänge zwischen 15 und 60 m (ältere Instrumente wie TIR auf HCMM [522, 608] haben eine Auflösung von 600 m). ITIR ist die Ergänzung zu HIRIS im thermischen Infrarot, die Aufgaben umfassen Oberflächengeologie, Mineralogie, Bodenbeschaffenheit, Bodentemperatur und geothermische Ressourcen. ITIR ist später zu ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection, [451]) mutiert und fliegt, wie MODIS, auf Terra, dem ehemaligen EOS-A Satelliten.

§ 559 Der Atmospheric Infrared Sounder AIRS [305, 450] dient zur Messung der atmosphärischen Temperatur und der Spurengase. Die räumliche Auflösung beträgt dabei zwischen 15 und 50 km. AIRS kann bis zu 49° zu beiden Seiten seiner Bodenspur scannen. Damit ist bei zwar geringer räumlicher Auflösung ein schneller Überblick über weite Bereiche möglich – man kommt der Momentaufnahme recht nahe. Die spektrale Auflösung ist mit 115 Kanälen hoch genug, um die Identifikation einzelner Spurengase zu ermöglichen. Bei der Messung des Temperaturprofils wird eine Genauigkeit von 1 K erwartet bei einer vertikalen Auflösung von 1 km. AIRS fliegt mittlerweile auf Terra [617].

§ 560 Das Advanced Microwave Scanning Radiometer AMSR [306, 384, 414, 644] ist ein passives Mikrowelleninstrument, das im Bereich zwischen 6.6 und 31.6 GHz arbeitet. Aufgabe ist die Messung atmosphärischen Wasserdampfes, der Oberflächentemperatur und des Oberflächenwindes über dem Meer. Die Temperaturauflösung liegt im Bereich von 1 K, die räumliche Auflösung variiert mit der Frequenz zwischen 9 und 50 km. Abgetastet werden Blickfelder von 1200 km Seitenlänge. AMSR fliegt auf Aqua [413].

§ 561 Die Advanced Microwave Sounding Unit AMSU [307, 624, 415] ist ein Radiometer zur Messung der atmosphärischen Temperatur- und Feuchteprofile. Die Temperaturauflösung beträgt 0.25 bis 1.3 K für Höhen zwischen der Oberfläche und 40 km. Die Temperaturprofile werden innerhalb von 15 Kanälen zwischen 23.8 und 89 GHz gemessen. Wasserdampf wird in fünf Kanälen zwischen 89 und 138 GHz gemessen. Das IFOV beträgt 50 km für die Temperaturmessung und 15 km für den Wasserdampf. Das Blickfeld des Instruments erstreckt sich 50° zu beiden Seiten der Bodenspur. AMSU fliegt auf den neueren POES Satelliten (POES-K/L/M) sowie auf Aqua [413].

§ 562 Das Altimeter (ALT) ist ein Radaraltimeter zur Untersuchung der Topographie von Ozeanen und Oberflächen. Verwendet werden zwei Frequenzbänder (5.3 GHz und 13.6 GHz), die Genauigkeit in der Bestimmung der Höhe soll 2 cm betragen.

§ 563 Das Atmospheric Lidar ATLID [161] ist ein Lidar, d.h. es arbeitet wie Radar, jedoch werden hier keine Mikrowellen eingesetzt, sondern es wird ein Laser verwendet. Aufgabe des Instruments ist die Bestimmung der Höhe von Wolkenoberkanten, atmosphärischen Inversionsschichten und der Verteilung von Aerosolschichten. Verwendet wird Strahlung im Bereich von 1.06 oder 1.53 μm . Die räumliche Auflösung beträgt 100 bis 500 m in vertikaler und 10 bis 50 km in horizontaler Richtung.

§ 564 Der Laser Atmospheric Wind Sounder LAWS [671] ist ein Doppler-Lidarsystem zur Messung der troposphärischen Luftbewegungen (Prinzip: Laser-Doppler-Anemometrie [733]). Die vertikale Auflösung beträgt 1 km, das Blickfeld 100 km². Die Geschwindigkeit kann auf 1 m/s genau bestimmt werden.

§ 565 Das Geoscience Laser Ranging System GLRS [423] ist ein Laser-Altimeter zur Bestimmung der Bewegung der Erdplatten – und damit ein würdiger Nachfolger für LAGEOS. Dazu sind verschiedene Punkte auf der Oberfläche mit reflektierenden Würfeln ausgestattet, so dass ihre Wanderung verfolgt werden kann. Ferner dient das GLRS zur topographischen Kartierung von Eis- und Landflächen sowie Wolkenoberkanten. Im Gegensatz zum Radaraltimeter ist der Durchmesser des abtastenden Strahls am Boden mit 80 bis 290 m klein.

3.7 Anwendungsbeispiele

§ 566 Bei den einzelnen Instrumenten wurden bereits Anwendungsbeispiele vorgestellt, in diesem Abschnitt finden Sie eine lose Sammlung von vielleicht nicht ganz so intuitiven Beispielen. Aber gerade diese Beispiele sollen auch einen Einblick in den Reiz bzw. die intellektuelle Herausforderung der Erdfernerkundung geben: Satelliteninstrumente können nur mit Hilfe elektromagnetischer Strahlung arbeiten (remote sensing lässt nichts anderes zu), einige der zu untersuchenden Fragen haben aber primär überhaupt keinen Bezug zur elektromagnetischen Strahlung. Die Herausforderung besteht darin, die wissenschaftliche Fragestellung soweit zu durchdringen, dass man indirekte Verfahren finden kann, die sich doch wieder im elektromagnetischen Spektrum abbilden lassen.

3.7.1 Archäologie und Anthropologie

§ 567 Archäologie und Anthropologie sind beides eher bodenständige Disziplinen, die man nicht gerade mit der noch recht jungen Disziplin der Erdfernerkundung vom Weltraum aus in Verbindung bringen würde. Dieser Eindruck ist auch insofern völlig korrekt, als dass beide Disziplinen nicht mit Erdfernerkundung in dem Sinne betraut sind, dass ein wissenschaftliches Ziel definiert wird und dann ein Instrument zur Erreichung dieses Zieles entworfen und gebaut wird. Beide Disziplinen bedienen sich jedoch gelegentlich der Erdfernerkundung als eines willkommenen Hilfsmittels.

§ 568 Die Archäologie bedient sich der Erdfernerkundung allerdings nicht erst seitdem diese durch Satelliten erfolgt. Auch normale Luftbilder wurden bereits im Dienste der Archäologie

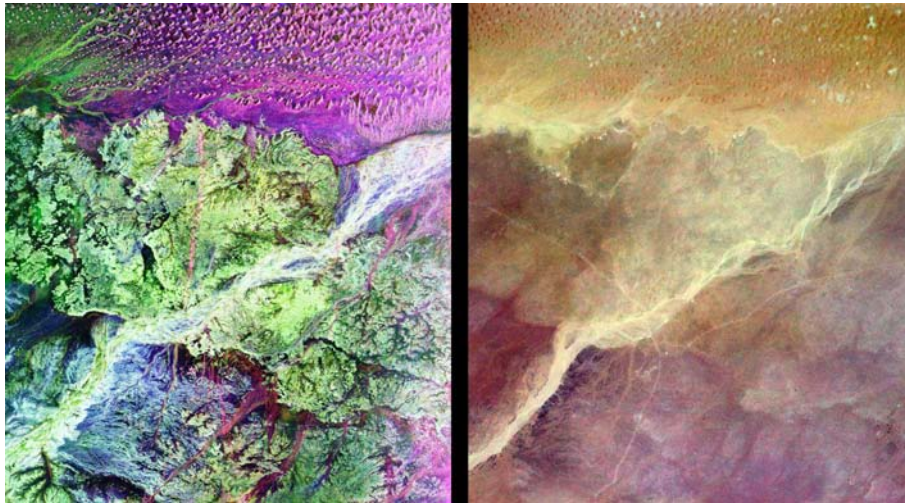


Abbildung 3.84: Ubar im sichtbaren (*rechts*) und im Radar (*links*) [472]

verwendet [43, 232]. So wurde Radar verwendet, um die Landnutzung durch die Mayas zu untersuchen [2]. Häufig kann man auch am Wachstum von Pflanzen erkennen, ob sich unter dem Boden Ruinenreste befinden oder nicht: ist der Boden über einer Ruine (z.B. einem Mauerrest) nur relativ dünn, so unterscheidet er sich sowohl im Feuchtigkeits- als auch im Nährstoffgehalt von seiner Umgebung. Als Konsequenz wachsen hier die Pflanzen, insbesondere Nutzpflanzen, anders und unterscheiden sich in Größe und häufig auch Farbe von ihren benachbarten Artgenossen. In [11] ist dieses Phänomen unter Verwendung von Luftbildern recht eindrucksvoll dargestellt. [209] diskutiert die Verwendung von Infrarotfarbfilmern (bzw. entsprechenden Daten von Scannern) zur Identifikation von Siedlungs- oder Infrastrukturresten römischen Ursprungs. Auch die Muster der Landnutzung prähistorischer Indianer in Arizona sind auf diese Weise untersucht worden.

§ 569 Strain und Engele [231] beschreiben als ein Beispiel für die Verwendung einer Kombination verschiedener Satelliteninstrumente in der Archäologie die Entdeckung von Ubar, einer verschwundenen Stadt, die T.E. Lawrence (Lawrence von Arabien) als das ‘Atlantis der Wüste’ beschrieb. Gradlinigie Strukturen, die auf den LandSat- und SPOT-Aufnahmen schwach erkennbar waren, konnten in der freien Natur nicht mit irgendwelchen besonderen Strukturen am Boden in Verbindung gebracht werden. Die Kombination mit Space Shuttle Radaraufnahmen von SICR-C/X-SAR [574] machte jedoch deutlich, dass es sich bei diesen Linien um alte Karawanenpfade handeln musste: zwar zeigt sich keine Delle im Wüstensand, da dieser alle Rinnen gleichmäßig zuweht, aber die Radaraufnahmen zeigen ein Signal, da hier der Boden verfestigt ist und die Sandschicht etwas dicker ist als in der Umgebung. Die Karawanenpfade konvergierten in einem engen Bereich, in dem man bei Ausgrabungen die Ruinen der Stadt fand.

§ 570 Abbildung 3.84 zeigt im rechten Teil eine Aufnahme der Umgebung von Ubar im sichtbaren, im linken Teil die zugehörige Radaraufnahme. Die Presseerläuterungen dazu stammen von [473]: “This pair of images from space shows a portion of the southern Empty Quarter of the Arabian Peninsula in the country of Oman. On the left is a radar image of the region around the site of the fabled Lost City of Ubar, discovered in 1992 with the aid of remote sensing data. On the right is an enhanced optical image taken by the shuttle astronauts. Ubar existed from about 2800 BC to about 300 AD. and was a remote desert outpost where caravans were assembled for the transport of frankincense across the desert. The actual site of the fortress of the Lost City of Ubar, currently under excavation, is too small to show in either image. However, tracks leading to the site, and surrounding tracks,

show as prominent, but diffuse, reddish streaks in the radar image. Although used in modern times, field investigations show many of these tracks were in use in ancient times as well. Mapping of these tracks on regional remote sensing images provided by the Landsat satellite was a key to recognizing the site as Ubar. The prominent magenta colored area is a region of large sand dunes. The green areas are limestone rocks, which form a rocky desert floor. A major wadi, or dry stream bed, runs across the scene and appears as a white line. The radar images, and ongoing field investigations, will help shed light on an early civilization about which little is known. The radar image was taken by the Spaceborne Imaging Radar C/X-Band Synthetic Aperture Radar (SIR-C/X-SAR) and is centered at 18 degrees North latitude and 53 degrees East longitude. The image covers an area about 50 kilometers by 100 kilometers (31 miles by 62 miles). The colors in the image are assigned to different frequencies and polarizations of the radar as follows: red is L-band, horizontally transmitted, horizontally received; blue is C-band horizontally transmitted, horizontally received; green is L-band horizontally transmitted, vertically received. SIR-C/X-SAR, a joint mission of the German, Italian and the United States space agencies, is part of NASA's Mission to Planet Earth."

§ 571 Radar wird auch verwendet, um trocken gefallene Flusstäler (Wadis) zu identifizieren. Diese sind in Nordafrika weit verbreitet und können als gute Hinweise bei der Suche nach alten Siedlungsplätzen dienen, da Ansiedlungen stets an Wasser gebunden sind. Da der Wüstensand extrem trocken ist, kann Radar die oberste Sandschicht durchdringen und darunter liegende Strukturen erfassen (das gleiche Prinzip hat auch im vorangegangenen Beispiel die Karawanenpfade deutlich hervortreten lassen). Damit lassen sich die ehemaligen Flussläufe, die weder in Aufnahmen im sichtbaren Bereich noch durch Untersuchungen vor Ort erkennbar sind, identifizieren. Strain und Engele [231] diskutieren in diesem Zusammenhang die Sanddünen im Tifernine Dünenfeld in Ostalgerien. In diesem Wüstengebiet lassen sich an einigen Stellen Hinweise auf ein prähistorisches Flusssystem finden. Dass das Klima an diesem Ort früher anders gewesen sein muss, belegen auch die etwa 6 000 Jahre alten Felszeichnungen im Tassili-N-Ajjer am Rande dieses Gebietes, die mit Jagdszenen, Giraffen, Wildschafen, Flusspferden und Antilopen ebenfalls auf ein gemäßigteres Klima hindeuten.

Verständnisfrage 32 Ähnliche Probleme mit verwischten Spuren gibt es in allen schnell veränderlichen Umgebungen: ein Schneesturm überlagert die Spur von Tourengehern, Sediment füllt die von einem Schleppnetz in den Meeresboden gerissene Furche. Lassen sich diese Situationen auf gleiche Weise nachweisen?

§ 572 Weitere Beispiele für den Einsatz von Radar in der Archäologie geben [468, 665]; allgemein wird der Einsatz von remote sensing Verfahren in der Archäologie an verschiedenen Beispielen beschrieben auf [394].

3.7.2 Vegetation

§ 573 Zur Untersuchung der Vegetation sind wie bereits beschrieben neben den Daten im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums insbesondere die Spektralkanäle im nahen Infrarot wichtig. Einige Beispiele für derartige Untersuchungen sind hier zusammengestellt, die Grundlagen für eine Klassifikation werden im Zusammenhang mit der Datenverarbeitung in Abschn. 7.3 vorgestellt.

Grundlagen der Pflanzenbeurteilung, Vegetationsindex

§ 574 Wir hatten im Zusammenhang mit der Diskussion der verschiedenen Satelliteninstrumente in Abschn. 3.2.5 bereits erwähnt, dass Beobachtungen im nahen Infrarot zur Bestimmung verschiedener Vegetationstypen und ihres Gesundheitszustandes verwendet werden können.

§ 575 Abbildung 3.85 zeigt dazu die Struktur eines Pflanzenblattes. Das vollständige Spektrum der solaren Strahlung fällt auf dieses Blatt. Die Bestandteile eines Blattes sind relativ

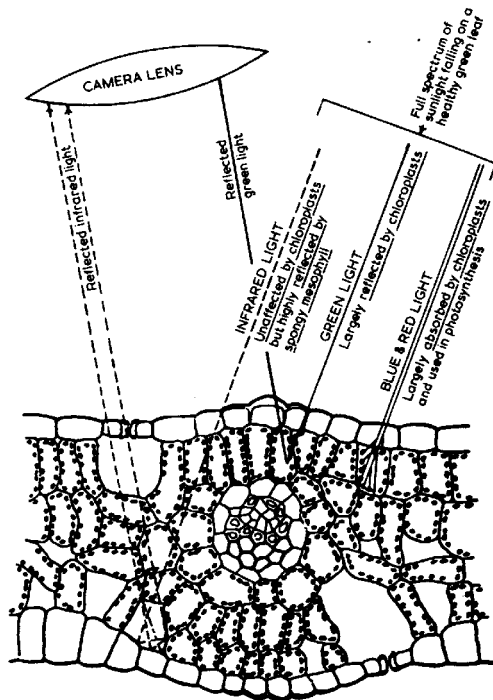


Abbildung 3.85: Struktur eines Pflanzenblattes und seine Reflektionsmerkmale [11]

transparent und absorbieren, mit Ausnahme der Pigmente im Chloroplast, keine nennenswerte Energie im sichtbaren Licht und nahen Infrarot. Das Blatt enthält viele Luft-Wasser-Übergänge zwischen den Zellwänden und dem interzellulären Raum. Der Unterschied im Brechungsindex des Wassers in den Zellwänden und der Luft in den Bereichen dazwischen bewirkt eine effiziente interne Reflektion des einfallenden Lichtes. Absorption findet nur in den Wellenlängen statt, die für die Photosynthese benötigt werden. Die wichtigsten Blattpigmente in diesem Bereich sind Chlorophyll a und b, Karotin und Xanthophyll, die alle in der Nähe von $0.445 \mu\text{m}$ (blau) absorbieren. Zusätzlich absorbiert Chlorophyll auch in der Nähe von $0.645 \mu\text{m}$ (rot). Ein geringer Teil der absorbierten Energie wird als Fluoreszenzlicht emittiert, der größte Teil wird durch Photosynthese umgewandelt.

§ 576 Für eine gesunde Pflanze ergibt sich das in Abb. 3.86 durch die durchgezogene Kurve dargestellte spektrale Reflektionsvermögen. Bei einer kranken Pflanze ist die Photosyntheserate geringer, so dass die Absorption im roten und blauen Bereich des Spektrums geringer

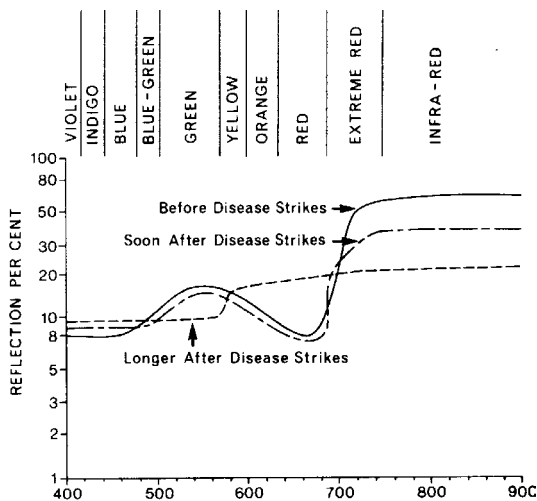


Abbildung 3.86: Charakteristisches spektrales Reflektionsvermögen gesunder und kranker Blätter [11]

ist und dort mehr Strahlung reflektiert wird. Der Hauptunterschied zwischen einer gesunden und einer kranken Pflanze zeigt sich jedoch am besten im nahen Infrarot: während ein gesundes Blatt durch das Mesophyll an der Blattunterseite den Großteil der Strahlung reflektiert, wird bei einer kranken Pflanze das Mesophyll porös und die Reflektivität im nahen Infrarot nimmt ab.

§ 577 Zur Beschreibung der Bioproduktivität einer Pflanze wurde ein normalized difference vegetation index NDVI [738] definiert; ein kontinuierlicher NDVI-Record seit 1982 findet sich unter [634]. Dieser ist gegeben als das normierte Verhältnis $(IR - Rot)/(IR + Rot)$ [8, 220]. Dieser NDVI ist einer der wichtigsten Indizes zur Beschreibung der Vegetation geworden. Der NDVI wird vereinfachend als Vegetationsindex bezeichnet. NDVI ist für ein bestimmtes Instrument, eben das AVHRR definiert; für SPOT 5 wird mit dem HRVIR ein ähnlicher Index erzeugt und unter [682] vertrieben.

§ 578 Der NDVI ist als das Verhältnis von Intensitäten in verschiedenen AVHRR-Kanälen definiert. Verwendet man ein anderes Instrument, so lässt sich häufig ein entsprechendes Verhältnis bilden. Dieses hat aber nur dann die gleiche Bedeutung wie der NDVI, wenn die Spektralkanäle identisches Ansprechvermögen haben – bei den verschiedenen AVHRR-Instrumenten sollte das der Fall sein.²⁷ Verschieben sich dagegen die Grenzen der Spektralkanäle (z.B. weil sich deren Zahl erhöht hat) oder vergrößert sich die Empfindlichkeit eines der Kanäle (z.B. weil der Detektor empfindlicher ist als der alte), so muss entweder ein neuer Index definiert werden oder der alte NDVI lässt sich nur mit Hilfe einer Normierung bestimmen. Da in letztere jedoch Annahmen über das Untersuchungsobjekt eingehen müssen (eine Art mittlere spektrale Empfindlichkeit), weicht dieser Index vom Original ab.

§ 579 Mit den heute zur Verfügung stehenden Instrumenten mit höherem spektralen Auflösungsvermögen lassen sich genauere Indices definieren, als Ersatz für den NDVI wird der FAPAR [366] diskutiert. Die Neudefinition eines Index ist ein zweiseitiges Problem. Selbst wenn der neue Index nach heutigem Wissensstand die Daten wesentlich besser (und vielleicht auch in einer der Fragestellung besser angemessenen Form) zu beschreiben vermag, ist er nicht unbedingt hilfreich. Die Neudefinition erfolgt in der Regel für moderne Experimente mit anderen Charakteristika. damit lässt sich der neue Index nicht rückwirkend für die nur mit alten Instrumenten beobachteten Zeiträume definieren. Im Interesse einer langen und homogenen Datenbasis wird daher auch der alte Index weiter bestimmt.

Waldschäden

§ 580 Diese Eigenschaft von Vegetation, im nahen Infrarot ein helles Signal zu erzeugen, lässt sich auf verschiedene Weise einsetzen. Das einfachste Beispiel ist die Forstwirtschaft, bei der auf diese Weise vom Satelliten aus eine großflächige Bestandserfassung auch in nur schwer zugänglichen Gebieten erfolgen kann. Da diese Untersuchungen schnell wiederholt werden können, lässt sich ein Waldschadensbericht erstellen, der auch die Veränderungen berücksichtigt, d.h. Fragen untersucht wie: (a) wie schnell breitet sich ein Schaden aus, (b) wie breitet sich der Schaden aus (da gibt es sicherlich Unterschiede, ob ein Schaden in der Folge des sauren Regens im wahrsten Sinne des Wortes von außen über die Pflanzen kommt oder ob es eine Pflanzenkrankheit bzw. ein Schädlingsbefall ist, die/der sich von einem oder mehreren Herden her ausbreitet), (c) gibt es Bereiche, die relativ resistent gegen diesen Schaden erscheinen und wodurch zeichnen sich diese Bereiche aus (z.B. Bodenqualität, die einen Einfluss auf die Widerstandsfähigkeit der Pflanzen allgemein haben kann; geringerer Stress auf die Pflanzen durch weniger exponierte Lage; bessere Nährstoffversorgung)? Ziel dabei kann es z.B. auch sein, bei einer Wiederaufforstung Areale mit unterschiedlichen Eigenschaften zu definieren und die jeweils für diese Umgebungsbedingungen am besten geeigneten Pflanzen dort anzupflanzen.

²⁷Umgekehrt erklärt diese Einschränkung auch, warum sich bewährte Instrumente nur sehr wenig weiter entwickeln. Im Interesse des Monitoring von global change müssen die alten Kanäle immer irgendwie mit gefolgt werden.

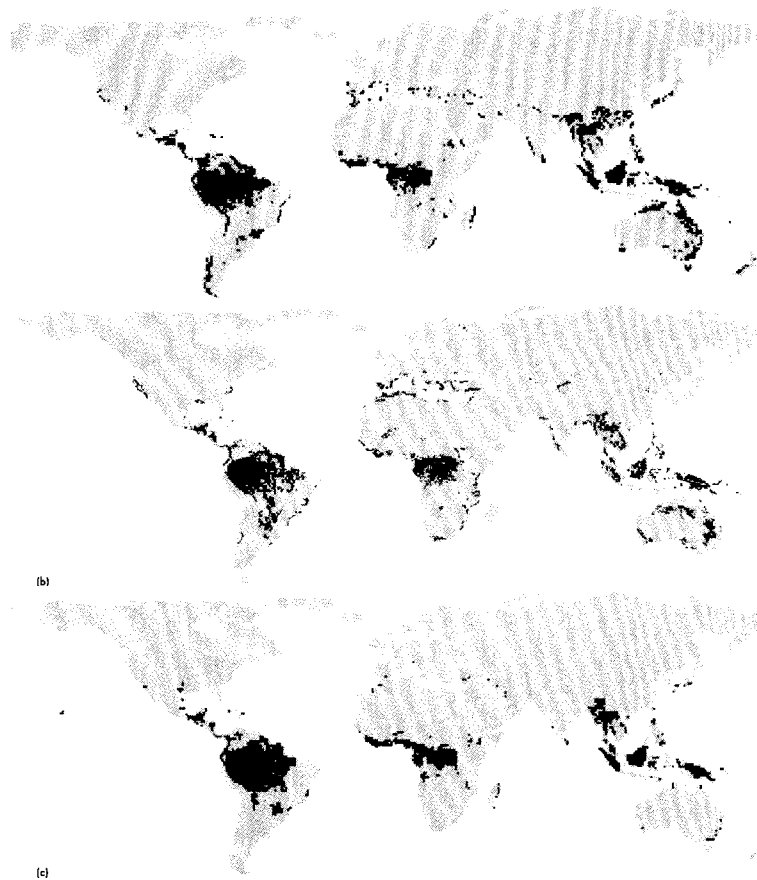


Abbildung 3.87: Globale Verteilung von 'breitblättrigen immergrünen Bäumen' bestimmt nach verschiedenen Verfahren aus AVHRR-Daten [44]

Globale Landbedeckung

§ 581 Die Untersuchung von Waldschäden betrachtet eher lokale Probleme und erfordert daher ein relativ gutes räumliches Auflösungsvermögen; das gröbere Auflösungsvermögen des AVHRR dagegen eignet sich sehr gut zur Untersuchung globaler Fragen. Ein Beispiel ist die mit den AVHRRs der POES-Satelliten angefertigte Inventur der Vegetation unseres Planeten [44, 169, 240]. Insbesondere Änderungen in der Landbedeckung sind von Bedeutung: diese beeinflussen das Klima u.a. durch Veränderung der Albedo, Evapotranspiration und durch die Aufnahme und/oder Emission von treibhauswirksamen Spurengasen. Für diese Aufgabe werden die AVHRR-Instrumente verwendet, da diese mit einer relativ groben räumlichen Auflösung von 1.1 km gegenüber LandSat und SPOT Beobachtungen noch handhabbare Datenmengen erzeugen. Auch ist die Wiederholrfrequenz wesentlich größer, so dass sich saisonale Variationen in der Vegetation besser studieren lassen. LandSat und SPOT haben zwar eine Wiederholrfrequenz von wenigen Wochen, aber da kann natürlich leicht mal bei dem einen oder anderen Überflug das Zielgebiet unter einer Wolkendecke verborgen sein, so dass es erst nach mehreren Monaten wieder beobachtet werden kann.

§ 582 Allerdings ist die Klassifikation der Vegetation nicht ganz so einfach wie man es sich vielleicht aus der in § 577 gegebenen Faustformel für den Vegetationsindex wünschen würde [44]. Zum ersten ist der NDVI jeder einzelnen Pflanze abhängig u.a. von der Beleuchtung (Intensität, Einfallswinkel), der Nährstoff- und Wasserversorgung, der Schadstoffbelastung und der Qualität des Bodens. Zusätzlich muss zur Bewertung der reflektierten Strahlung

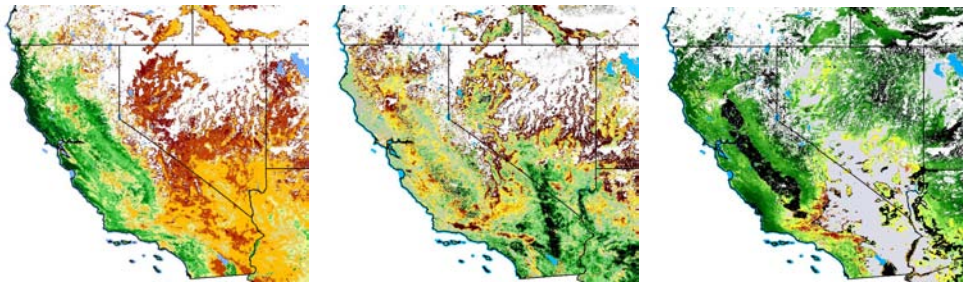


Abbildung 3.88: *Links*: NDVI oder Greenness als Maß für Pflanzenvitalität im Februar 2008 in Kalifornien; *Mitte*: Abweichungen vom langjährigen Mittel; *Rechts*: Waldbrandgefahr; erstellt mit [707]

außer dem Reflektionsvermögen des einzelnen Blattes bekannt sein die gesamte vom Satelliten einsehbare Blattoberfläche und die Neigung der einzelnen Blätter (z.B. durch Wind), da Blattober- und -unterseite unterschiedliche Reflektionsvermögen haben können. Dadurch wird die Trennung zwischen verschiedenen Pflanzenspezies weniger scharf, entsprechendes gilt auch für die Beurteilung ihres Gesundheitszustandes.²⁸

§ 583 Zusätzlich finden sich innerhalb eines Pixels verschiedene Pflanzenarten, es wird ein Teil des Bodens und, bei Vorhandensein, auch des Gesteins im Pixel erfasst (vgl. die Diskussion über Mischpixel im Zusammenhang mit Abb. 3.50). Dadurch ergeben sich Unterschiede in der Klassifikation der Vegetation, die von den Bearbeitungsverfahren der einzelnen Beobachter und ihren Modellannahmen abhängen.

§ 584 Zur Illustration, welche unterschiedlichen Resultate die aus den AVHRR-Aufnahmen nach verschiedenen Verfahren bestimmten Verteilungen der Vegetation liefern können, zeigt Abb. 3.87 die globale Verteilung einer bestimmten Vegetationsart, in diesem Falle der ‘breitblättrigen immergrünen Bäume’, wie sie von drei verschiedenen Arbeitsgruppen mit ihren jeweiligen Methoden bestimmt wurde. In allen drei Interpretationen gibt es bestimmte Kernbereiche, in denen diese Vegetation vorkommt, insbesondere global in den niedrigen Breiten (Regenwälder). Die Ränder dieser Bereiche und die Vorkommen dieser Pflanzengruppe außerhalb der Kerngebiete unterscheiden sich in den drei Bildern jedoch teilweise beträchtlich. Die starke Abweichung zu den Rändern hin erklärt sich zumindest teilweise aus der Tatsache, dass dort die Wahrscheinlichkeit für Mischpixel immer größer wird und dementsprechend die Identifikation der Vegetation ungenauer wird bzw. im Rahmen einer eher regionalen Studie mit Daten mit besserer räumlich Auflösung durchgeführt werden sollte.

§ 585 Da es AVHRR und POES schon einen hinreichen langen Zeitraum gibt, lässt sich mit Hilfe dieser Daten eine Klimatologie des NDVI erzeugen – im Internet unter [634] zu finden. Mit einer Klimatologie steht aber auch die Möglichkeit zur Verfügung, die aktuellen Daten im Hinblick auf Abweichungen gegenüber dem langjährigen Mittel darzustellen.

§ 586 Als Beispiel zeigt Abb. 3.88 im linken Teil den Vegetationsindex bzw. modern die ‘Greenness’ für Kalifornien gemittelt für die ersten beiden Wochen des Februar 2008. Das mittlere Teilbild zeigt die Abweichung gegenüber dem langjährigen Mittel: grau bedeutet keine Abweichung, Grüntöne wie zu erwarten eine höhere Greenness als im Mittel, Brauntöne eine geringere. Als weiteres Produkt lässt sich auf der Basis der Greenness ein Fire Potential Index (rechts) erstellen: grüne Flächen haben ein geringes Potential zum Brennen, rötliche ein höheres. Grau ist übrigens nicht Fels sondern landwirtschaftlich genutzte Fläche – brennt die nicht?

²⁸Die für moderne Personalpapiere beizubringenden Photos sind mit einem ähnlichen Problem behaftet: der Kopf hat sich gefälligst in ein bestimmtes Raster einzufädeln. Photos aus dem täglichen Leben dagegen erfüllen die durch das Raster gegebenen Anforderungen in der Regel nicht.

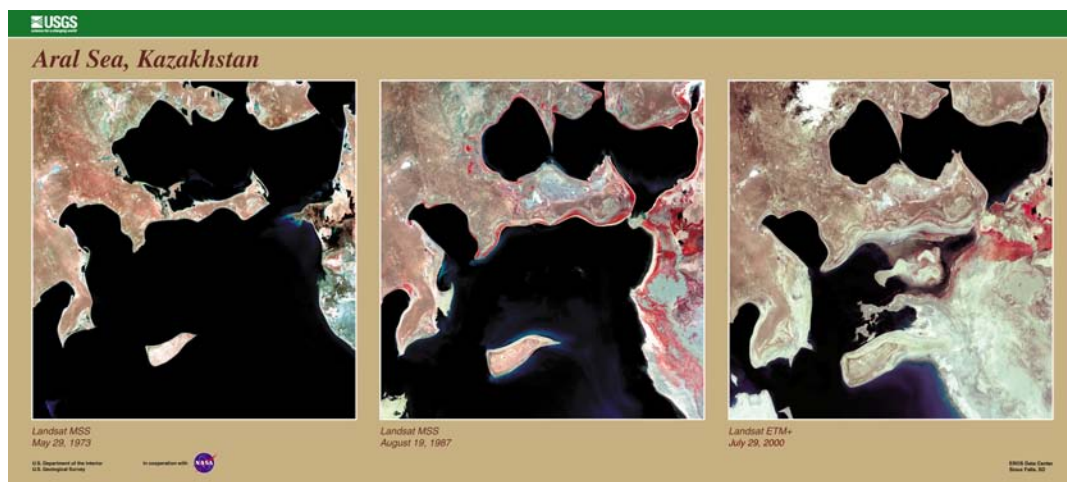


Abbildung 3.89: Veränderung des Aralsees [487]

Waldbrände

§ 587 Ein weiteres, mit der Vegetation zusammen hängendes Thema der Erdfernerkundung sind die bereits erwähnten Wald- und Flächenbrände, siehe auch Abb. 1.14. Im sichtbaren Bereich sind sie in der Regel an ihrer Rauchwolke zu erkennen, die sich zumindest bei wolkenfreiem Himmel gut gegenüber der Umgebung abzeichnet. Noch besser zu identifizieren sind sie im thermischen Infrarot als deutliche Wärmeinseln. Hier ist einmal die Information über die Vernichtung von Biomasse und damit den Kohlendioxideintrag in die Atmosphäre interessant (insbesondere natürlich bei weit ausgedehnten Bränden in schwer zugänglichen Bereichen).

§ 588 Forstwirtschaftler und Biologen interessieren sich aber auch für die Zeit nach dem Waldbrand und studieren dazu das Verheilen der Brandnarben – heute helfen natürlich auch die Disaster Forscher aus Abb. 3.7.5 bei dieser Aufgabe. Untersucht werden soll dabei die Selbstheilungskraft der Natur sowie die Charakteristika der Pionierpflanzen, die als erste ein zerstörtes Gebiet wiederbesiedeln. Wissen dieser Art wird z.B. im Rahmen des Fire-Managements in den nordamerikanischen Nationalparks benötigt. Fire-Management bedeutet dabei, dass man heutzutage bestrebt ist, natürlich ausbrechende Feuer (Blitzschlag) nicht mehr zu löschen sondern brennen zu lassen. Die dahinter liegende Idee orientiert sich an der Tatsache, dass es auch früher Waldbrände gegeben hat, die zwar individuelle Pflanzen zerstört haben, die die Vegetation insgesamt aber überlebt hat, und dass diese Brände für die Bestandspflege wichtig sind: zu dichtes Unterholz wird ausgedünnt, die Alterspyramide der Bäume wird modifiziert (es gibt weniger alte und damit gegenüber Feuer und Schädlingen sehr empfindliche Bäume) und einige Pflanzen benötigen Feuer sogar, um sich zu vermehren: bei vielen Eukalyptusarten z.B. ist die Samenkapsel sehr hart und benötigt Feuer um aufzuplatzen – hier vernichtet ein Feuer zwar einen alten Bestand, legt aber gleichzeitig auch die Grundlage zur selbsttätigen Wiederaufforstung und damit auch zur Bestandserneuerung.

Versalzung

§ 589 Ebenfalls recht einfach durch Betrachtung eines Kanals bzw. eines Falschfarbenbildes zu erkennen sind Gebiete starker Versalzung. Dabei gibt es natürliche Gebiete wie z.B. Salztäler in den Dünenfeldern der großen arabischen Wüste (Rub el Khali) oder in der Dasht-e-Kavir (große Salz- und Geröllwüste im Iran). Letztere ist besonders interessant, da sich hier durch zeitweise aus dem Grund hervortretendes Wasser neue Salzablagerungen bilden, die sich durch die Fernerkundung gut dokumentieren lassen. Auch die Parceval-Seen in Australien sind ein gutes Beispiel, an dem sich Versalzung studieren lässt.

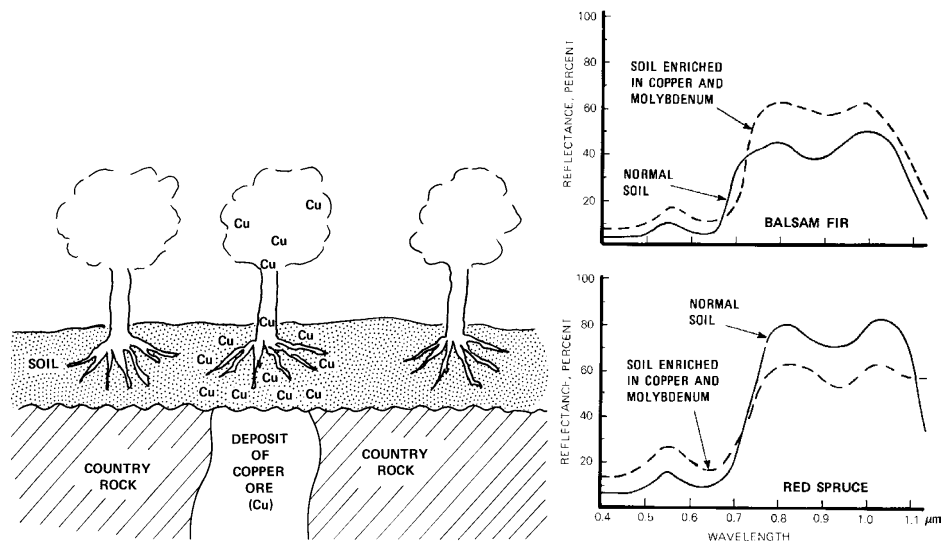


Abbildung 3.90: Übergang von unterliegenden Metallen in den Boden und die Pflanzen bei einer verdeckten Kupferader (oben) und Veränderung des spektralen Reflektionsvermögens dieser dotierten Pflanzen [209]

§ 590 Versalzung ist aber nicht nur ein natürlicher Vorgang sondern an vielen Stellen, gerade in den Trockengebieten der Erde, ein durch menschliche Eingriffe hervorgerufen oder beschleunigter Vorgang. Diese anthropogene Versalzung entsteht durch Überbewirtschaftung landwirtschaftlich genutzter Flächen in Gebieten mit hoher Verdunstungsrate. Das Prinzip ist einfach: aufgrund der hohen Verdunstungsrate werden große Mengen an Wasser auf die Felder gepumpt, um überhaupt ein gewisses Maß an Bewässerung zu erreichen. Von diesem Wasser verdunstet aber der größte Teil, wobei sich die Mineralsalze auf der Oberfläche ablagern und so eine Salzschiicht bilden. Diese Salzschiicht ist der weiteren landwirtschaftlichen Nutzung der Fläche abträglich, da es kaum Pflanzen (und schon gar keine Nutzpflanzen) gibt, die gegen Salz resistent sind. Versalzung wird insbesondere dann zu einem Problem, wenn die landwirtschaftlich genutzten Flächen sich immer weiter ausdehnen bzw. nach einsetzender Versalzung verlagert werden. [109] diskutiert als ein Beispiel die Versalzung in Folge künstlicher Bewässerung in den Randgebieten der Sahara, [437] zeigt LandSat Aufnahmen über einen längeren Zeitraum aus denen die Zerstörung der Marschländer Mesopotamiens durch landwirtschaftliche Nutzung gefolgt von Versalzung zu erkennen ist.

§ 591 Eng mit dem Problem der künstlichen Bewässerung verbunden ist aber auch die Verkleinerung natürlicher Wasserreservoirs durch Wasserentnahme aus diesen bzw. aus ihren Zuflüssen. Das prominenteste Beispiel dürfte die Verkleinerung des Aralsee sein, in Abb. 3.89 mit verschiedenen LandSat-Generationen dokumentiert.

Bodenschätze

§ 592 Ein Anwendungsbeispiel für Erdfernerkundung in den Geowissenschaften ist die Suche nach Bodenschätzen, häufig unter Verwendung der Informationen im thermischen IR (siehe auch Abb. 3.58). Hierfür werden die Informationen über die Geländeform und die Gesteinsarten verwendet. Diese Verfahren versagen jedoch, wenn man ein mit Vegetation bedecktes Gelände betrachtet: dann gibt es keine direkten Informationen mehr über das Oberflächengestein.

§ 593 Hier bedient man sich indirekter Verfahren, wie in Abb. 3.90 illustriert: befindet sich eine Pflanze über einer Erzader, im Beispiel Kupfer, so nimmt die Pflanze durch ihre Wurzeln einen Teil dieses Erzes auf (linkes Teilbild). Dadurch verändert sich aber das spektrale Reflek-

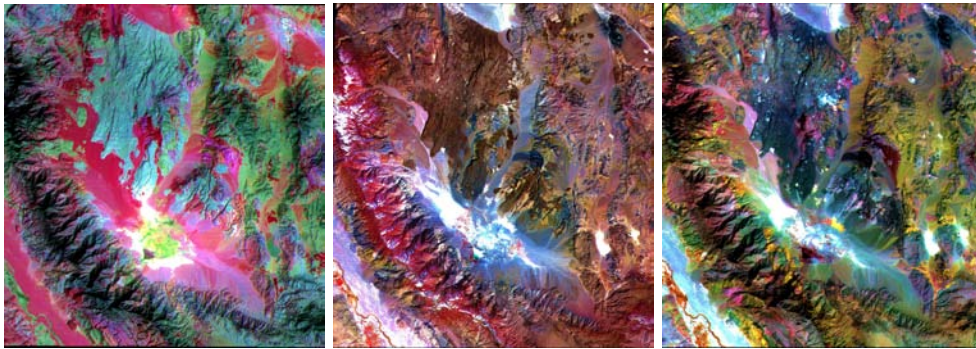


Abbildung 3.91: Geologie im Saline Valley, Ca, mit ASTER auf Terra [666]

tionsvermögen der Pflanzen (Beispiele im rechten Teil von Abb. 3.90). Diese Pflanzen können nach den gleichen Prinzipien, wie man es auch bei der Identifikation von Pflanzen- bzw. Bodenbedeckung allgemein macht, identifiziert werden. Die wichtigste Veränderung im spektralen Reflektionsvermögen ist die Blauverschiebung des steilen Anstieges beim Übergang zum nahen Infrarot. Diese Verschiebung scheint bei vielen Mineralien und verschiedenen Pflanzensorten aufzutreten und könnte daher als ein generelles Merkmal für verdeckte Erzlagerstätten dienen [209]. Allerdings bedarf es hier noch genauerer Untersuchungen.

§ 594 Liegt das Gestein offen, so kann man sich direkterer Verfahren bedienen, wie in der mit ASTER auf Terra gemachten Aufnahme des Saline Valley in Abb. 3.91 angedeutet. Im linken Teilbild sind die Kanäle im sichtbaren und nahen Infrarot in der Reihenfolge 3 (IR), 2 (rot), 1 (grün) abgebildet auf rot, grün und blau (RGB). Wie üblich für Infrarot-Falschfarben-Aufnahmen erscheint die Vegetation rot; Schnee und trockene Salzseen erscheinen weiß, frei liegender Fels ist braun, grau, gelb und blau. Die Farben des Fels sind durch die Anwesenheit von eisenhaltigen Mineralien und Variationen in der Albedo bestimmt. Im mittleren Teilbild sind die kurzwelligen Infrarotkanäle in der Reihenfolge 4, 6, 8 auf RGB abgebildet. In diesem Wellenlängenbereich unterscheiden sich die Absorption von Ton und Karbonat- bzw. Sulphat-haltigen Mineralien deutlich, so dass sich diese in der Abbildung durch unterschiedliche Farben identifizieren lassen. Im rechten Teilbild sind die Kanäle 13, 12, 10 des thermischen Infrarot als RGB dargestellt. In diesem Bereich erzeugen Variationen im Quarzgehalt unterschiedliche Rotanteile während Karbonathaltiges Gestein grün erscheint und vulkanisches Gestein violett.

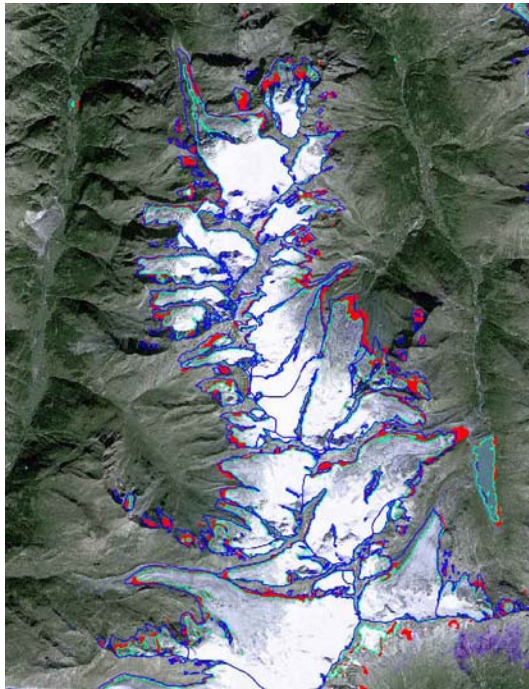
3.7.3 Hydrosphäre

§ 595 Die Beobachtung der Ozeane erfolgt klassisch im thermischen Infrarot, vgl. Abb. 3.62. Beobachtungen in anderen Spektralbereichen geben jedoch auch über andere als nur die physikalischen Eigenschaften Auskunft, vgl. Abb. 3.98. Und Mikrowelleninstrumente sind zur Untersuchung von Feuchte in jeder Form gut.

Schnee und Meereis

§ 596 Daten über die Schneebedeckung werden in der Meteorologie benötigt zur Bestimmung der Art und Menge des Niederschlages, wobei insbesondere die Verfahren zur Bestimmung der Dicke der Schneedecke bzw. ihres Wasseräquivalents noch sehr in den Kinderschuhen stecken. Andere Interessenten an Daten über die Schneebedeckung sind die Klimatologen, die Straßenmeistereien (Räumdienste) und die Betreiber von hydro-elektrischen Anlagen. Insbesondere letztere interessiert natürlich das Wasseräquivalent der Schneedecke, da dieses nach der Schneeschmelze zur Stromerzeugung zur Verfügung steht. Das Abschmelzen von Gletschern und Eisschilden ist natürlich auch zur Untersuchung des global change von Interesse.

Abbildung 3.92: Rückgang der Gletscher in der Mischabelgruppe [694]: Veränderungen der Ausdehnung von Gletschern in der Mischabelgruppe (Wallis), bestimmt auf der Basis von LandSat TM Aufnahmen. Gletscherrückgang zwischen 1985 und 1998 ist in rot dargestellt, die Umrisse der Gletscher im Jahre 1998 sind in rot, die von nachträglich digitalisierten Quellen für 1973 in blau gegeben



§ 597 Die Schneebedeckung wird übrigens nicht nur als Selbstzweck für alle Fragen im Zusammenhang mit Schnee benötigt. Zusätzlich wird Schneebedeckung auch benötigt, um den Vegetationsindex genauer zu bestimmen bzw. Verfälschungen dieser Größe durch Schneebedeckung zu erkennen [155].

§ 598 Die Bestimmung der Meereisbedeckung ist ebenfalls für die Meteorologie von Interesse, da die globalen Wetterformationen (Lage der Polar- und Subtropenfronten und damit die Wanderung einzelner Tief- und Hochdruckgebiete) auch von der Temperatur des Untergrundes abhängen. Zusätzlich sind Informationen über Meereisbedeckungen natürlich auch für die Schifffahrt von Bedeutung. Die Bestimmung der Meereisbedeckung wird durch die verschiedenen Formen des Eises verkompliziert: so erzeugen schnelles Eis, Packeis, Eisberge, Eisschollen, sowie frisches und altes (in der korrekten Terminologie einjähriges und mehrjähriges) Eis unterschiedliche Signaturen. Zur Bestimmung der Eisbedeckung werden Aufnahmen im nahen Infrarot (z.B. LandSat MSS Band 7), im thermischen Infrarot sowie Radaraufnahmen verwendet. Alle diese Verfahren können im Prinzip als gleichwertig betrachtet werden, allerdings haben thermisches Infrarot und Radar den Vorteil, dass sie auch während der (Polar)Nacht eingesetzt werden können. Aufnahmen im thermischen Infrarot haben zusätzlich den Vorteil, dass sie eine Abschätzung der Dicke der Eisschicht erlauben: Wasser ist wärmer als Eis, erscheint also im Infrarotbild heller. Andererseits wirkt die Eisschicht aber auch als ein Isolator für das darunter befindliche Wasser, so dass zwischen Eis und Wasser meist ein deutlicher Temperaturunterschied besteht. Ist die Eisschicht nur sehr dünn, so lässt sie mehr Strahlungsenergie des wärmeren Wassers durch als eine dicke Eisschicht und erscheint damit heller.

§ 599 Bei relativ hoher Wiederholrfrequenz (z.B. tägliche Aufnahmen) lässt sich aus der Verlagerung charakteristischer Merkmale im Eis (Schollenform, eingefrorene Eisberge) auf die Driftrichtung und -geschwindigkeit der Eismasse zurückschließen. Dadurch lassen sich Eiswarnungen für nahe liegende Schifffahrtsrouten geben.

§ 600 RadarSat-1 hat die Antarktis mehrfach genauer kartiert [389]. Neben der normalen Suche nach Veränderungen ist dabei auch Interferometrie verwendet worden. Weitergehend

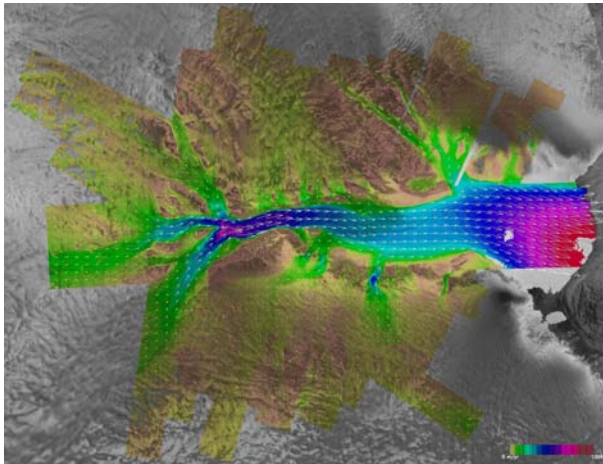


Abbildung 3.93: Geschwindigkeitsfeld Lambert Gletscher [390]

als in Abb. 3.77 lassen sich auch die Geschwindigkeit des Eises rekonstruieren. Abbildung 3.93 zeigt ein Beispiel.

§ 601 Die Fließgeschwindigkeit des Eises ist ein Maß für die lokale Veränderung des Gletschers. Veränderungen lassen sich auch in Satellitenaufnahmen stets nur durch den Vergleich von Aufnahmen der gleichen Region zu verschiedenen Zeiten bestimmen. Was für ein Bauvorhaben, Erdbebenspalten, Wanderdünen oder die Bodenbedeckung durch Nutzpflanzen noch leicht zu erkennen ist, wird bei einem Gletscher problematischer: im wesentlichen ist ein Gletscher eine mehr oder weniger uniform weiße Fläche – ob sich die um ein Stückchen verschoben hat oder nicht, ist primär nicht zu erkennen. Allerdings zeigt ein genauerer Blick auf den Gletscher Strukturen (Spalten, Gletscherbruch, Schmelztröge, von den Hängen gestürztes Geröll, Mittelmoränen) und z.B. von den angrenzenden Hängen gestürztes Geröll. Durch Korrelationen zwischen den zu verschiedenen Zeiten aufgenommenen Einzelbildern lassen sich auch diese Unterschiede identifizieren. Ein Beispiel für Mare de Glace Beobachtungen im Sichtbaren gibt [149], das Verfahren unter Verwendung von Aufnahmen unterschiedlicher Satelliten(instrumente) ist in [148] genauer beschrieben.

§ 602 Geologische Fragestellungen werden nicht nur auf der Erde sondern auch auf anderen Planeten untersucht. Die dabei verwendeten Instrumente basieren natürlich auf den gleichen Prinzipien wie die in der terrestrischen Fernerkundung eingesetzten. Das interessanteste und dynamischste Untersuchungsobjekt dürfte der Mars sein. neben den bekannten Kanälen, Polkappen, Gesichtern und sonstigen Eigenschaften, ist auf Mars mit der Beobachtung einer Lawine [631, 674] etwas gelungen, was auf der Erde bisher nicht vom Satelliten gesehen wurde.

Ölfilme auf Wasser

§ 603 Hierbei geht es um die Identifikation von Ölverschmutzern und natürlichen Ölaustrittsgebieten. Natürliche Ölverschmutzer tragen ungefähr das fünffache der Menge zur Ölverschmutzung der Meere bei, die durch Ölbohrungen vor der Küste eingetragen wird, sind aber dennoch klein gegenüber der Ölverschmutzung, die durch defekte Pipelines entsteht [209]. Zur Identifikation eines Ölfilmes können UV, sichtbares Licht und nahes Infrarot ebenso wie thermisches Infrarot und Radar verwendet werden.

§ 604 Abbildung 3.94 zeigt das spektrale Reflektionsvermögen von Seewasser und von einem dünnen Ölfilm für den Bereich vom Ultravioletten bis hin zum nahen Infrarot. Öl auf Wasser kommt in verschiedenen dicken Schichten vor: was wir von einer Pfütze oder einer nassen Straße als schillernden Ölfilm kennen, ist ein sehr dünner Film. Dieser kann sich als geschlossener Film nur auf relativ ruhigen Wasserflächen ausbilden, auf bewegtem Wasser zerreisst der Film sofort und bildet Inseln. Diese Filme sind auch relativ leicht im sichtbaren Licht zu

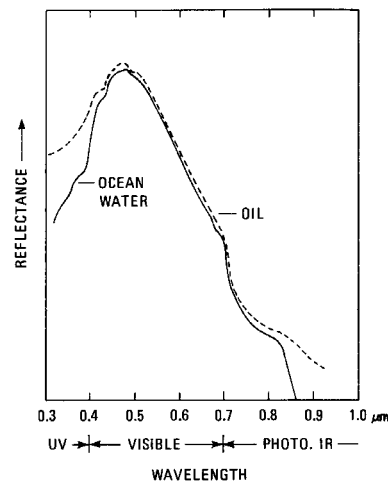


Abbildung 3.94: Spektrales Reflektionsvermögen von Seewasser und einer dünnen Ölschicht [209]

erkennen. Im Falle eines Ölunfalls, d.h. des Austritts größerer Mengen Öls, kommt es nicht zur Bildung dünner Filme, vielmehr ist der größte Teil der betroffenen Fläche von einer dicken, breiigen Ölschicht bedeckt, die bräunlich bis schwarz aussieht. In diesem Bereich ist die größte Menge des Öls konzentriert. Insbesondere diese dicken Schichten gilt es zu entdecken.

§ 605 Relativ dünne Schichten lassen sich im UV-Licht als helle Bereiche erkennen, da das Reflektionsvermögen einer dünnen Ölschicht für UV-Strahlung wesentlich höher ist als für Wasser (siehe Abb. 3.94). In diesem Bereich ist der Unterschied des spektralen Reflektionsvermögens von Öl und Wasser am größten, d.h. im UV-Bereich sollten die Instrumente am leichtesten in der Lage sein, einen Ölfilm nachzuweisen. Allerdings wird die UV-Strahlung in der Atmosphäre stark gestreut und absorbiert, so dass eine Einsatz derartiger Instrumente auf Satelliten nicht sinnvoll ist. Mit einem in einer Höhe unterhalb 1 000 m fliegenden Flugzeug dagegen lassen sich im UV-Licht noch Ölfilme von einer Dicke von 0.15 mm erkennen. Allerdings haben auch Gischt und einige Algen sehr helle Signaturen im UV-Bereich, so dass hier andere Spektralbereiche ebenfalls überprüft werden sollten, um eine Verwechslungsgefahr zu vermeiden.

§ 606 Im sichtbaren Bereich lassen sich zwei Effekte zur Entdeckung eines Ölfilms verwenden, zum einen das spektrale Reflektionsvermögen wie in Abb. 3.94 dargestellt, zum anderen die Eigenschaft des Ölfilms, kleine Wellen zu dämpfen, wodurch die Wasseroberfläche ruhiger wird. Diese ruhigen Wasserflächen reflektieren jedoch weniger Licht, so dass sie sich gegenüber dem sauberen umgebenden Wasser dunkel abzeichnen. Auf diese Weise lässt sich der Ölfilm vom Satelliten aus dann weniger direkt (d.h. über das veränderte spektrale Reflektionsvermögen) als vielmehr indirekt, nämlich über seine Auswirkungen auf die Feinstruktur der Wasseroberfläche, beschreiben. Mit Radar lassen sich derartige Bereiche ruhigeren Wassers natürlich auch nachweisen. Dieser indirekte Nachweis hat den Vorteil, dass er selbst bei dicken Ölschichten noch funktioniert.

§ 607 Auch im thermischen Infrarot lassen sich Ölfilme erkennen. Das erscheint auf den ersten Blick eher überraschend, da ja das Öl die gleiche Temperatur haben sollte wie das Wasser, auf dem es schwimmt. Diese Betrachtung ist auch korrekt, zumindest dann, wenn man den Ölfilm durch Temperaturmessung mit einem Thermometer nachweisen wollte. Allerdings hängt die abgegebene Strahlung nicht nur von der Temperatur des Körpers ab, sondern auch von seinem Emissionsvermögen, siehe (3.6). Das Emissionsvermögen von reinem Wasser beträgt 0.993. Befindet sich ein dünner Ölfilm auf dem Wasser, so beträgt das Emissionsvermögen nur noch 0.972, d.h. es wird insgesamt weniger Strahlung emittiert. Bestimmt man die Strahlungs- oder Effektivtemperatur gemäß (3.7), so erhält man für das reine Wasser eine höhere Strahlungstemperatur als für den Ölfilm. Betrachten wir ein Beispiel: bei einer

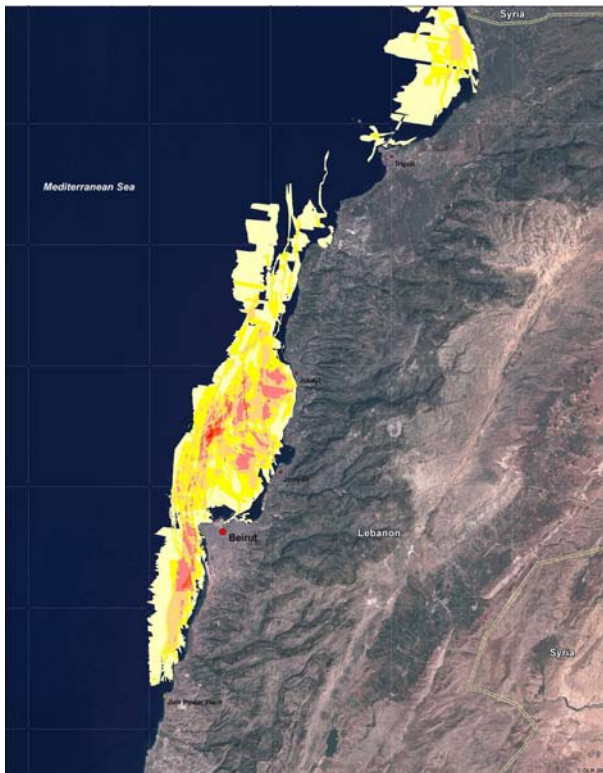


Abbildung 3.95: Ölverschmutzung vor der Küste des Libanon 2006 [291]

Wassertemperatur von 18°C würde sich für reines Wasser eine Strahlungstemperatur von 17.5°C ergeben, für den Ölfilm aber eine von 15.9°C , d.h. ein Unterschied von 1.6 K, d.h. selbst mit einem einfachen IR-Scanner zuverlässig nachgewiesen werden kann.

§ 608 Als Beispiel für die Anwendung derartiger Daten im Krisenmanagement zeigt Abb. 3.95 die von Satelliten beobachtete Ölverschmutzung der Küste nach der Zerstörung der Raffinerie Jieh Power Plant südlich von Beirut. Für diese Darstellung wurde eine LandSat-Karte als Hintergrund gewählt, der Ölfilm auf dem Wasser wurde aus verschiedenen Satellitendaten zu sechs verschiedenen Zeiten bestimmt. Die Farbkodierung gibt an, zu wie vielen dieser Zeitpunkte das entsprechende Gebiet mit Öl bedeckt war.

Verständnisfrage 33 Sechs Satelliten zur Verbesserung der Genauigkeit durch Mittelung oder warum?

El Niño

§ 609 Zu den elementarerer Fragen, die mit Hilfe von Satellitenmessungen beantwortet werden sollen, gehört die Bestimmung der Oberflächentemperatur der Ozeane. Abbildung 3.96 zeigt einen Überblick über die Oberflächentemperaturen der Ozeane für die Monate Januar (oben) und Juli (unten). Es bildet sich ein deutliches zonales System aus mit den höchsten Temperaturen um den Äquator und niedrigeren Temperaturen an den Polen. Diese extremen Bereiche zeigen kaum eine jahreszeitliche Variation, während in den mittleren Breiten eine deutliche jahreszeitliche Abhängigkeit der Oberflächentemperatur zu erkennen ist, die sich einerseits aus der veränderten Einstrahlung, andererseits aber auch durch infolge der veränderten Einstrahlung geänderte atmosphärische und ozeanische Zirkulationsmuster ergibt.

§ 610 Während die in Abb. 3.96 gezeigte Temperaturverteilung fast trivial ist, sind es die auf mittleren räumlichen Skalen stattfindenden Phänomene, die ein größeres Interesse hervorrufen. Dazu gehören z.B. die Struktur des Golfstroms und El Niño, das Christkind. Der

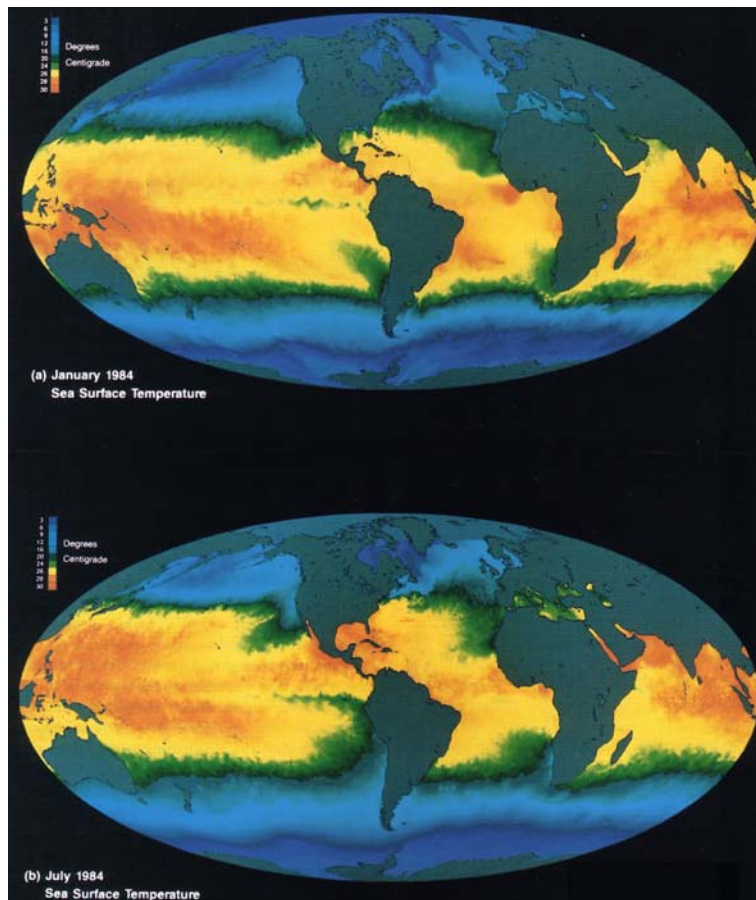


Abbildung 3.96: Mittlere Oberflächentemperatur der Ozeane für Januar (oben) und Juli (unten). Während sich in den Tropen und den Polregionen kein Jahresgang der Temperatur findet, ist in den mittleren Breiten eine deutliche Jahreszeitenabhängigkeit zu erkennen [177]

Golfstrom (vgl. Abb. 3.62) ist eine warme Meereströmung, die sich von der Saragossa-See über den Atlantik bis vor die Küste Norwegens erstreckt und für das Klima in Mittel- und Nordeuropa von regulierender Bedeutung ist. Die Existenz des Golfstromes als warme Strömung (und damit Heizung für unsere Breiten) ist lange bekannt, aber erst Satellitenaufnahmen haben einige Eigenarten des Golfstromes gezeigt. So fließt der Golfstrom nicht wie ein ruhiges Band dahin, sondern er bildet Verwirbelungen und Mäander. Manchmal können sich solche Wirbel ablösen und als warme Wasserringe in Gebiete nördlich oder südlich des Golfstromes vorstoßen. Umgekehrt kann durch solche Wirbel auch kaltes Wasser aus den umgebenden Bereichen in den Golfstrom eingezogen werden und dort einen Kaltwasserring bilden. Inwieweit diese Wirbel Rückwirkungen auf Biologie und Chemie der Ozeane sowie auf atmosphärische Vorgänge haben, bleibt noch zu klären [218].

§ 611 Während der Golfstrom ein dauerhaftes Merkmal der Zirkulation im Atlantik ist, gibt es auch Zirkulationsanomalien, die nach heutigen Kenntnissen nicht vorhersagbar sind. Ein Beispiel ist El Niño: vor der peruanischen Küste verschwinden gelegentlich zu Weihnachten die Fische, da sich um diese Zeit das Meerwasser plötzlich und stark erwärmt und damit für die Fische keine ausreichende Menge an Nährstoffen zur Verfügung steht. Aufgrund seines Auftretens um die Weihnachtszeit herum wird dieses Phänomen als El Niño bezeichnet - das Christkind. Diese Periode warmen Oberflächenwassers dauert in der Regel bis in den März an, danach normalisiert sich die Temperaturverteilung wieder. In einigen Fällen dauert El Niño jedoch länger und kann sich sogar über Jahre erstrecken. Damit ergeben sich entsprechend katastrophale Folgen für die lokale Ökonomie. Diese langandauernden El Niños treten nur alle paar Jahre auf, bisher gibt es keine Vorhersagemöglichkeiten dafür. Die Temperaturanomalie des warmen Oberflächenwassers und vor allen Dingen ihre räumliche Ausdehnung und zeitliche Entwicklung lassen sich mit den Infrarotsensoren von Satelliten sehr gut erfassen.

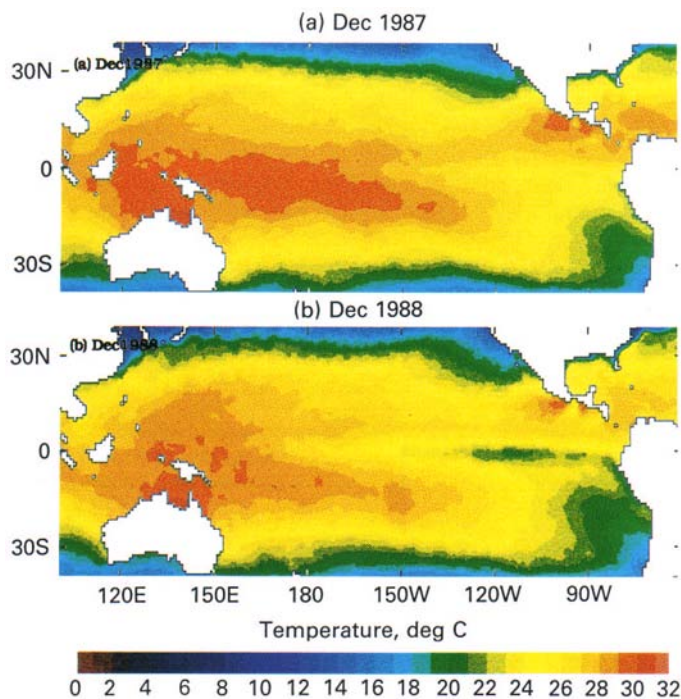


Abbildung 3.97: Oberflächentemperaturen im äquatorialen Pazifik während (Dezember 1987) und nach (Dezember 1988) einem El Niño [177]

§ 612 Den Schlüssel zum Verständnis dieses Phänomens bildet die Southern Oscillation (Walker-Zirkulation): diese beschreibt die bisher nicht vollständig verstandene Kopplung des Luftdrucksystems im Ostpazifik mit dem des Westpazifiks. Die Passatwinde als Bestandteil der Hadley-Zirkulation werden durch die beiden beständigen Hochdruckgebiete im Pazifik - über den Osterinseln im Süden und vor Kalifornien im Norden - umgelenkt, so dass sie vor der amerikanischen Pazifikküste in Richtung auf den Äquator und damit auf die innertropische Konvergenzzone zu wehen. Der Südostpassat treibt den Humboldtstrom und schiebt damit Oberflächenwasser von der Küste weg. Dadurch kann kälteres, nährstoffreicheres Wasser aus der Tiefe aufquellen. Dieses zeigt sich in den Satellitenaufnahmen als ein kühler Bereich vor der südamerikanischen Pazifikküste (vgl. unteres Teilbild in Abb. 3.97). Das weggetriebene warme Wasser dagegen staut sich im westlichen Pazifik. Die hohen Verdunstungsraten aus dieser Warmwassermasse führen zu starken Regenfällen in Indonesien und Südostasien. Zusammengefasst bedeutet also ein kalter Ostpazifik gleichzeitig starke Regenfälle in Indonesien. Diese Kopplung zwischen zwei Ereignissen in weit auseinanderliegenden Bereichen der Erde wird als Telekonnektion bezeichnet.

§ 613 In der Atmosphäre besteht entsprechend der Wassertemperaturen eine negative Druckanomalie über Indonesien, die mit einer positiven Druckanomalie im pazifischen Hochdruckgebiet gekoppelt ist. Dabei entsteht eine Zirkulationszelle, die entlang eines Breitenkreises, und nicht, wie bei der großskaligen Zirkulation sonst üblich, entlang eines Längengrades ausgerichtet ist. Diese Zelle wird von der normalen Hadley-Zirkulation überlagert. Im Nettoeffekt bewirkt dann der Auftrieb kalten Äquatorwassers vor der amerikanischen Pazifikküste eine Abkühlung und damit eine Schwächung der innertropischen Konvergenzzone. Damit geht aber auch dem Südost-Passat ein Teil seines Antriebs verloren, er wird schwächer. Ein schwächerer Südost-Passat kann aber nicht mehr soviel warmes Wasser von der peruanischen Küste wegtreiben, die innertropische Konvergenzzone wird wieder gestärkt, damit auch der Südost-Passat und der Kreislauf kann erneut beginnen.

§ 614 Das El Niño Phänomen ist mit dem Zusammenbruch des Passatwindsystems im Westpazifik und einem Umspringen dieser Passate in bodennahe Westwinde gekoppelt. Dann strömt das in den Westpazifik getriebene warme Wasser wieder in Richtung auf die amerika-

nische Westküste zurück und blockiert dort den Auftrieb kalten Tiefenwassers, der eigentliche El Niño entsteht, vgl. Abb. 3.97 oben. Durch die Westwinde kommt es zu einem Aufsteigen feuchter Luft an der amerikanischen Ostküste, die Feuchtigkeit kondensiert und es kommt in normalerweise trockenen Gebieten zu starken Regenfällen. Die dann trockene Luft strömt in großen Höhen wieder Richtung Westen zurück, so dass es über Indonesien zur Ausbildung einer ungewöhnlichen Trockenheit kommt.

§ 615 Die Auswirkungen von El Niño betreffen jedoch anscheinend nicht nur die unmittelbaren Bereiche dieser Walker-Zirkulation. Die Warmwasseranomalie in den Tropen kann die Zirkulation bis in die mittleren Breiten beeinflussen. In Zusammenhang mit dem Auftreten von El Niños könnte das Auftreten von Überschwemmungen in Kalifornien, Dürren in Afrika und Indien sowie starker Trockenheit in der ex-UdSSR und anderen Teilen der Erde stehen (für eine Zusammenfassung und Zitate siehe z.B. [116]). Bei einem weiteren Studium dieses Phänomens wird sich die Verwendung von Satelliten als hilfreich erweisen, da dadurch viele der zu beobachtenden Parameter (Oberflächentemperaturen, Windgeschwindigkeiten, Wolken, Luftfeuchtigkeit, Niederschlag) an allen Orten standardisiert bestimmt werden können, so dass sich die Beeinflussung entfernter Regionen durch El Niño besser nachweisen lässt.

Die Farbe des Meeres

§ 616 Das Schlagwort ‘die Farbe des Meeres’ bezieht sich eigentlich weniger auf die bisher genannten Untersuchungen, auch wenn die Aufnahmen im thermischen Infrarot normalerweise als eindrucksvolle farbige Aufnahmen dargestellt werden. Bei ‘die Farbe des Meeres’ handelt es sich um Untersuchungen des Planktons, d.h. der elementarsten Form von Leben im Meer, deren Verteilung gleichzeitig auch die Möglichkeiten der höheren Meeresbewohner, von den kleinsten Garnelen bis zu den größten Walen, bestimmt, da Plankton den Anfang der Nahrungskette bildet.

§ 617 Wichtigstes Instrument ist hier der Coastal Zone Color Scanner CZCS [507] auf Nimbus 7 [558]. Der Name des Instrumentes ist scheinbar irreführend, da sich die Beobachtungen keinesfalls auf die Küstenregionen beschränkt, sondern die Meere insgesamt umfasst. Und die Bezeichnung ‘Color’, die zu dem Schlagwort von der ‘Farbe des Meeres’ geführt hat? Beim CZCS handelt es sich um einen Multispektralscanner, der dem MSS auf LandSat und den AVHRRs auf den POES-Satelliten ähnlich ist. Im Zusammenhang mit der Identifikation von Vegetation hatten wir bereits auf die Verwendung verschiedener Kanäle zur Identifikation des spektralen Reflektionsvermögens hingewiesen. Dabei zeigte sich, dass die Verwendung breiter Kanäle die Unterscheidung erschwert, da über verschiedenen Spektralbereiche mit unterschiedlichem Reflektionsvermögen hinweggemittelt wird. Daher ist für Studien der Vegetation ein besseres spektrales Auflösungsvermögen anzustreben.

§ 618 Da beim CZCS die Zahl der Spektralkanäle ebenso wie bei den anderen Instrumenten begrenzt ist, hat man sich dadurch beholfen, dass man statt der normalerweise breiten Spektralbänder wie z.B. bei MSS, TM oder AVHRR, nur für die Identifikation von Plankton wichtige enge Spektralbereiche ausgeschnitten hat. Damit lässt sich zwar kein Bild in den realen Farben mehr rekonstruieren, wie es z.B. bei den LandSat Aufnahmen möglich ist, aber hieraus ergibt sich keine Einschränkung für das Instrument, da es nicht wie die LandSat-Instrumente als Universalderkundungsinstrument konzipiert ist, sondern bereits als zweckgebundenes Instrument. Die typischen Spektralkanäle von LandSat- und NOAA-Instrumenten sind in Tabelle 3.1 aufgelistet, der CZCS dagegen misst in 6 Bändern von 0.433 - 0.453 μm , 0.51 - 0.53 μm , 0.54 - 0.56 μm , 0.66 - 0.68 μm , 0.6 - 0.8 μm und 10.5 - 12.5 μm . Das Bodenauflösungsvermögen beträgt 825 m, was aber in Anbetracht der zu untersuchenden Flächen schon fast zu gut ist (Problem der Datenflut im Vergleich zu den Skalen, auf denen sich räumliche Veränderungen ergeben; außerdem wäre auf Grund der kleinen Spektralbereiche sonst die Zahl der einfallenden Photonen zu gering). Mit diesen Kanälen lassen sich die Chlorophyll-Pigmente des Planktons sehr gut und eindeutig nachweisen.

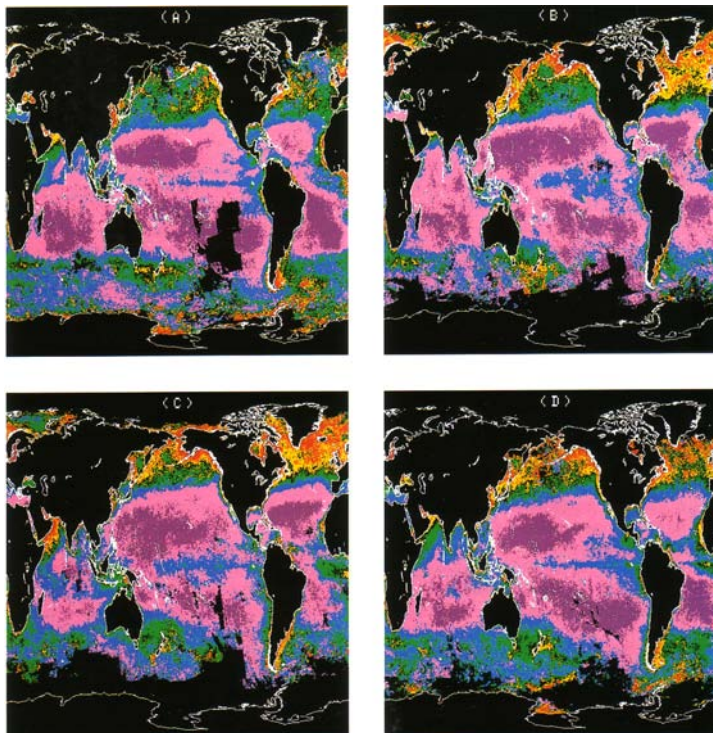


Abbildung 3.98: Die Farbe des Meeres: Pigmentkonzentration (Farbskala: violett – blau – grün – gelb – orange – rot) im Winter (A), Frühjahr (B), Sommer (C) und Herbst (D) [164]

§ 619 Die CZCS-Ergebnisse haben im wesentlichen die Erkenntnisse bestätigt, die man bereits seit einem Jahrhundert Meereskunde kannte (und die dem Instrument das ‘coastal’ im Namen beschert haben): Plankton ist in den flachen Küstenbereichen wesentlich stärker vorhanden als im freien Ozean. Die neuen Ergebnisse betrafen dagegen zum einen die prinzipielle Möglichkeit, die Gewässerbereiche an Arktis und Antarktis zu studieren und die jahreszeitlichen Veränderungen zu untersuchen. So zeigte sich z.B. dass in diesen beiden sehr kalten Bereichen die Algenblüte im lokalen Frühjahr in ihrer Intensität und damit auch Biomasseproduktivität ohne weiteres mit der in den küstennahen Gewässern gemäßigter Breiten vergleichbar ist, siehe Abb. 3.98.

§ 620 Ein deutlicher Unterschied zwischen Land und Meer zeigt sich in den Tropen: während hier die Bioproduktivität an Land sehr groß ist (zumindest, wenn der Mensch ihr freien Lauf ließe und nicht durch Brandrodung zur Zeit eine Abnahme der Biomasse bewirken würde), sind die tropischen Meere die Bereiche geringster Bioproduktivität; sie werden daher auch als die Wüsten der Meere bezeichnet (daher auch die wirtschaftlichen Einbrüche durch El Niño).

3.7.4 Geowissenschaften

§ 621 Die Geowissenschaften bedienen sich des vollständigen Spektrums der Erdfernerkundungsinstrumente. Im sichtbaren Bereich sind Satellitenaufnahmen schon alleine deshalb von Bedeutung, will sie einen guten Überblick über weite Bereiche erlauben. Dadurch lassen sich die großen Strukturen wie die Beziehungen zwischen verschiedenen Landformen, Deformationsmuster und Muster von Entwässerungsnetzen erkennen. Besonders wertvoll haben sich die Landsat-Aufnahmen bei der Identifikation von Falten und Bruchlinien erwiesen: Aufgrund lokaler Unterschiede (Vegetation, Beleuchtung, teilweise auch Erosion) lassen sich diese Strukturen auf Luftbildaufnahmen (auch auf Mosaiken aus Luftbildaufnahmen) häufig nicht eindeutig identifizieren. Auf den meisten der Satellitenbilder zeichnen sich jedoch solche langen Linienstrukturen deutlich ab. Die Identifikation dieser Linien ist auch von allgemeinem Interesse, da sie häufig die großen Spalten- und Faltensysteme repräsentieren, die für

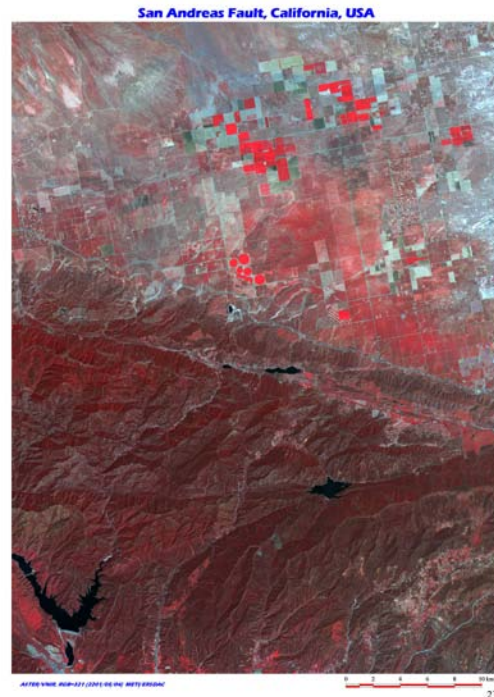


Abbildung 3.99: St. Andreas Graben [335] in der Nähe von Palmdale; die Falte verläuft durch die Bildmitte

die Ausbildung von Erdbeben von Bedeutung sind.

§ 622 Abbildung 3.99 zeigt als Beispiel den St. Andreas Graben in der Nähe von Palmdale, nördlich von Los Angeles. Die Falte selbst zieht sich durch die Bildmitte. Sie erstreckt sich von NNW nach SSO durch Kalifornien. Die Falte hat sich aus dem Zusammentreffen der Nordamerikanischen Platte mit der Pazifik-Platte gebildet; ihre Ausdehnung wird auf mindestens 1200 km geschätzt. Die Falte bewegt sich mit einer mittleren Geschwindigkeit von 2 cm/Jahr. Das Loma Prieta Erdbeben mit einer Stärke von 7.1 ereignete sich an dieser Falte; das Erdbeben von 1906 mit einer Stärke von 8.25 ereignete sich in der Nähe von San Franzisko ebenfalls an dieser Falte – seine Folgen haben wir bereits in Abb. 1.7 gesehen.

§ 623 Nicht nur lineare Strukturen wie Erdbebenspalten können zu groß sein, um anders als mit Hilfe von Erdfernerkundung erkannt zu werden. Ein Beispiel für eine zirkulare Struktur ist in Abb. 3.100 gegeben: die Vredefort Ringstruktur befindet sich 120 km südwestlich von Johannesburg und hat einen Durchmesser von mehr als 100 km. Da sich die für eine Meteoritenkollision typischen Minerale innerhalb dieser Struktur nachweisen lassen, könnte es sich um einen Einschlagkrater handeln, der vor ca. 2 Mio Jahren entstand. Auch die Schichtung der Gesteine spricht für diese Hypothese.

§ 624 So verlockend es sein mag, eine zirkulare Struktur als Einschlagkrater zu interpretieren – nicht jede runde Struktur hat diesen Ursprung. Die in Abb. 3.101 gezeigte Richat-Struktur, auch als das Auge der Sahara bezeichnet, befindet sich in der westlichen Sahara in Zentral-Mauretanien und hat einen Durchmesser von 38 km. Anfänglich als Einschlagkrater interpretiert, wurde diese Hypothese verworfen: es lassen sich weder die typischerweise bei der Kollision entstehenden Materialien finden und die Tiefe ist im Vergleich zum Durchmesser zu gering. Der seine Umgebung um ca. 100 m überragende Rand besteht aus Quarzite, einem sehr verwitterungsbeständigen Material. Die Struktur wird daher eher als Intrusion interpretiert. Im oberen Bildteil lassen sich die Makteir Sanddünen nördlich der Richat-Struktur erkennen.

§ 625 Zwar nicht zirkular aber ebenfalls zu großräumig um vom Boden eindeutig erkannt



Abbildung 3.100: Vredefort Ring Struktur in Südafrika [336]

zu werden, ist die Caldera²⁹ des Yellowstone mit einer Länge von ca. 80 km und einer Breite von bis zu 55 km. Sie stammt von einem ca. 2 Mio Jahre zurück liegenden Ausbruch; weitere Ausbrüche erfolgten vor ca. 1.2 Mio Jahren und vor ca. 640 000 Jahren. Vom Boden aus sind diese Strukturen daher nicht nur auf Grund ihre Größe sondern auch auf Grund der Veränderungen durch Erosion schwer auszumachen. Dass der Yellowstone eine aktive Gegend ist, ist allerdings schon längst bekannt und wird z.B. durch die Geysire deutlich angezeigt. Auch zeigen genauere Beobachtungen, u.a. mit ortsfesten GPS Empfängern, dass sich Boden am nördlichen rand hebt [715]. Eine Überwachung derartiger aktiver Supervulkane ist sicherlich sinnvoll, da deren Eruptionen globale Folgen (u.a. vulkanischer Winter, siehe auch [165]) haben können. Um eine Überwachung durchzuführen, müssen die Calderen dieser Supervulkane aber erst einmal identifiziert werden – wobei Satellitenaufnahmen unerlässlich sind.

§ 626 Neben der großräumigen Struktur ist aber auch die Beschaffenheit des Gesteins von Interesse. Hier werden neben Aufnahmen im sichtbaren Bereich insbesondere solche im thermischen Infrarot verwendet, da hier verschiedene Gesteine unterschiedliche Signaturen in ihrem spektralen Emissionsvermögen aufweisen (vgl. Abb. 3.58). Instrumente im thermischen Infrarot erlauben auch den Nachweis unterirdischer Kohlefeuer [236], die durch Selbstentzündung entstehen und, wenn sie sich in der Nähe eines Abbaubereiches befinden, zum Eindringen giftiger Gase in die Grube führen können.

²⁹Eine Caldera (spanisch, Kessel) [719] entsteht bei einem Vulkanausbruch, wenn dieser die Struktur des Vulkans zerstört und dabei die ehemalige Magmakammer freigelegt wird – sei es durch Explosion oder Einsturz. Die Eruption des Mount St. Helens hat eine kleine Caldera hinterlassen, die sich wieder mit Magma füllt und aus der ein neuer Vulkankegel hervorwächst. Der Teide auf Teneriffa ist noch weithin als Berg von mehr als 3000 m Höhe zu erkennen und hat anstelle eines Gipfels eine Caldera von ca. 17 km Durchmesser. Die Insel Santorin ist ein weiteres Beispiel für eine, allerdings größtenteils versunkene, Caldera. Vulkane dieses Typs sind besonders gefährlich, da Wasser und Magma eine explosive Kombination bilden – der Krakatau [732] dürfte das am besten dokumentierte Beispiel aus der jüngeren Geschichte sein. Aber nicht nur in den versunkenen Vulkaninseln liegt ein Großteil der Caldera unter Wasser. Auch viele Calderen von landgebundenen Vulkanen füllen sich mit Seen; der Krater des Pinatobu auf den Philippinen ist ein recht junges Beispiel, der von ca. 74 000 Jahre entstandene Krater des Toba im nördlichen Sumatra mit einer Länge von 100 km eines der größten.

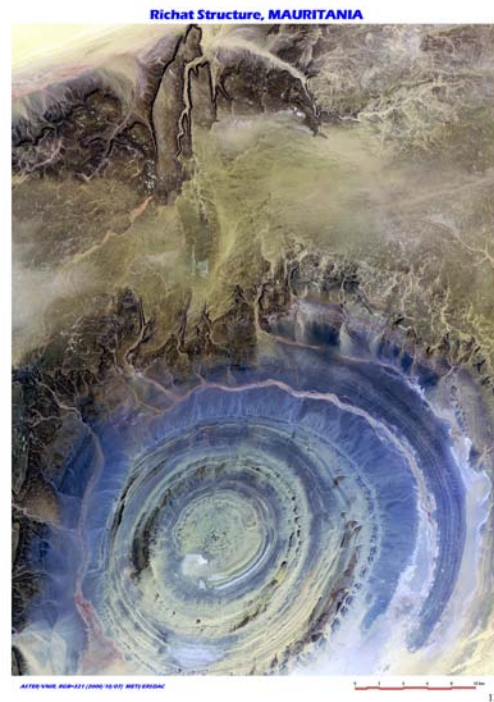


Abbildung 3.101: Das Auge der Sahara, die Richat Struktur [334]

§ 627 Radar wird ebenfalls in den Geowissenschaften verwendet. Zum einen erlaubt Radar, im Gegensatz zu anderen Instrumenten, die Bestimmung von Höhen, d.h. es lässt sich eine wirklich drei-dimensionale Topographie erstellen (vergleiche das SeaSat Altimeter, wie in Abschn. 3.4.1 beschrieben). Radar-Imaging wird ebenfalls verwendet, da Radar in trockenen Gebieten die Sandschicht durchdringen kann und somit Informationen über den darunter liegenden festen Grund liefert; die Anwendung in der Archäologie (Abschn. 3.7.1 und Abb. 3.84) ist ein Beispiel.

§ 628 Eine weitere wichtige Anwendung von Satelliteninstrumenten in den Geowissenschaften ist die Beobachtung von aktiven Vulkanen. Verwendet werden hier Instrumente im sichtbaren Bereich und nahen Infrarot zur Beobachtung der Lavaströme und der Rauchwolken, sowie Instrumente im thermischen Infrarot zur Beobachtung des Vulkanmassivs direkt und zur Abschätzung des Austrittszeitpunktes der Lava (je jünger die Lavaschicht ist, um so wärmer ist sie noch, d.h. die Temperatur erlaubt Rückschlüsse auf das Alter). Altimeter weisen zusätzlich auf Hebungen oder Senkungen von Vulkanflanken hin – eine sehr wichtige Information bei den Vulkanen, die wie der Mt. St. Helens oder der Pinatobu zur Explosion neigen.³⁰ Vulkanbeobachtungen werden u.a. durchgeführt zum Zwecke der Warnung der Anlieger vor einem zu erwartenden Ausbruch. Da die lavahaltige Erde an Vulkanhängen sehr fruchtbar ist, sind gerade Gebiete an Vulkanen häufig relativ dicht besiedelt. Dass die Erde dort fruchtbar ist, kann man auch in Falschfarbenaufnahmen erkennen, wo die vulkanischen Berge ein wesentlich stärkeres Signal im nahen Infrarot erzeugen als benachbarte, nicht-aktive Berge.

³⁰Grob lassen sich Vulkane in zwei Typen einteilen: explosiv oder effusiv. Letztere ist durch Magma geringer Viskosität charakterisiert. dadurch fließt das Magma recht stetig ab und ist nicht in der Lage, den Schlot der Magmakammer zu verstopfen. Der Ätna und die Vulkane auf Hawaii sind Beispiele. Explosive Eruptionen setzen sehr viskoses Magma voraus: dieses staut sich im Schlot, so dass sich in der Magmakammer über längere Zeiten ein immer höherer Druck aufbaut – der sich dann irgendwann explosiv entlädt. Die Folgen sind entsprechend weitreichender als bei einem effusiven Vulkan – insbesondere, wenn der Ausbruch an der Flanke des Vulkans erfolgt oder wenn, wie bei Santorin oder Krakatau Wasser im Spiel ist.



Abbildung 3.102: Der Satellit drängt in die Nachrichten: Manhattan vor und nach 9/11 gesehen von Ikonos-2 [672]

3.7.5 Disaster Management und Verwandtes

The Earth is the most dynamic planet in our solar system and it is this dynamism that has given us our protective magnetic field, our atmosphere, our oceans and ultimately our lives. The very same geophysical features that make Earth so life-giving and preserving also, however, make it dangerous.

McGuire [165]

§ 629 Mit der schnellen Verfügbarkeit von Satellitendaten (und letztendlich auch der Kommerzialisierung) hat sich ein neuer Aspekt in ihre Nutzung eingeschlichen: das Disaster Management [248]. Im Zusammenhang mit Waldbränden, (Super-)Vulkanen und Ölverschmutzungen ist uns diese Variante der Nutzung von Satellitendaten im Skript bereits begegnet; der breiten Öffentlichkeit wurde sicherlich im Zusammenhang mit 9/11 die Verbreitung der Satellitenbeobachtungen bewusst gemacht; ein Beispiel ist der typische Satz von vorher/nachher Bildern wie in Abb. 3.102. Ausgedehnte Waldbrände sind in den Nachrichten ohne das zugehörige Satellitenbild kaum noch der Meldung wert; die vorher/nachher Bildserien nach dem Hurrikan Katrina in New Orleans oder dem Tsunami im Indischen Ozean haben wahrscheinlich auch den Fundraisern geholfen, in dem sie das Ausmaß der Schäden zeigen konnten. Letztendlich hat aber auch Abb. 1.7 ein Jahrhundert zuvor schon die gleichen Nebenwirkungen gehabt.

§ 630 Die von der Presse verwendeten Bilder stammen zunehmend von professionellen Krisenmanagern und kommerziellen Agenturen; für letzteres ist Abb. 3.102 ein gutes Beispiel. Auch das DLR enthält ein ‘Center for Satellite based crisis Information – emergency mapping and disaster monitoring’ [292]; von diesem stammt z.B. Abb. 3.95. Ebenfalls aus öffentlichen Mitteln gefördert wird RISK-EOS [657] in Zusammenarbeit mit der ESA und GEMS [372] als EU-Projekt, alles mit Hilfe der International Charter ‘Space and Major Disaster’ [383] auf rechtlich solide Füße gestellt. Natürlich verkaufen auch NASA [408], JAXA [385], ISRO [382] und sicherlich noch etliche andere ‘Sicherheit’ als ein Nebenprodukt ihrer Erderkundungsaktivitäten.

§ 631 Kommerzielle Anbieter sind in dieser Hinsicht sogar wesentlich deutlicher: European Space Imaging [367] bietet seine Produkte für ‘Relief & Emergency Operations’ an, wozu Bestimmung des Schadensausmaß, mögliche Rettungs- und Evakuierungsrouten, Bestimmung

finanzieller Verluste (auch für Versicherungen) sowie Bestimmung der Schäden an der Infrastruktur gehören. Auch Satellite Imaging Corporation [664] bietet seine Hilfe an. Unter der Rubrik ‘Natural Hazards and Disaster Assessment and Management’ geht es im wesentlichen um Erdbeben – wobei die Zerstörung der Wälder als Voraussetzung ebenfalls berücksichtigt wird. Die Hurricanes werden in einer eigenen Rubrik ‘Hurricane, Tornados and Cyclone Hazard Mitigation’ angeboten, natürlich mit den üblichen vorher/nachher Aufnahmen von Katrina (bzw. eher New Orleans).

§ 632 Während die Raumfahrtagenturen Disaster im wesentlichen im Sinne von Naturkatastrophen sehen, sprechen die kommerziellen Anbieter eine wesentlich deutlichere Sprache. So bietet GeoEye [374] die Rubrik ‘Natural Security’ [375] mit dem üblichen vorher/nachher-Vergleich, nur diesmal für einen Raketenangriff – die Luftaufnahmen kehren zu ihrem Ursprung zurück. Auch Satellite Imaging Corporation [664] bietet hier Hilfe an in den drei Eskalationsstufen ‘Law Enforcement — Crime Mapping’, ‘Homeland Security’ (inkl. Beispielen für Anfahrtsrouten für Helfer am 9/11 und einem Beispiel für die Risikoanalyse für eine größere Anlage, siehe auch Abb. 1.11) sowie ‘Defense and Intelligence Mapping’. Und bevor wir mit dem Finger auf die Amerikaner zeigen: European Space Imaging [367] bietet uns ebenfalls eine Rubrik ‘National/Global Security’ und SPOT.COM bietet die Rubrik ‘Defence, Intelligence, Security’ [677] sowie die Variante ‘Hazard management and mitigation’ [678].

§ 633 Katastrophenmanagement nicht als Beiprodukt sondern als eigenes Ziel hat die Disaster Monitoring Constellation DMC [329, 723]. Diese besteht z.Z. aus fünf Satelliten verschiedener Länder (Algerien, Türkei, Nigeria, China, Großbritannien) deren Hauptaufgabe die Erdbeobachtung zur Erstellung von Hilfsplänen nach (Natur-)Katastrophen ist. Die meisten der Satelliten tragen zusätzliche (experimentelle) Instrumente – DMC bietet bisher nicht raumfahrenden Nationen einen Einstieg in die Satellitenfernerkundung unter einem akzeptablen Anwendungszweck und mit industrieller Unterstützung ‘erfahrener’ Nationen und Firmen. Ob diese Satelliten beim Disaster Relief wirklich zusätzlich zu den ganzen anderen privaten und öffentlichen Spähern helfen (je mehr Satelliten, um so besser die zeitliche Überdeckung eines Bereichs), entzieht sich meiner Kenntnis.

§ 634 Da das Deckmäntelchen Disaster zur Zeit modern ist, hat auch der MeteoSat-Betreiber EuMetSat mit ‘GMES – EUMETSAT Contributes to Global Monitoring for Environment and Security’ [364] hieran teil – allerdings weniger mit dem Disaster Management sondern stärker unter dem Gesichtspunkt global change. Letztendlich ist dieses Programm natürlich auch ein Verkaufsargument für die neue Serie polarer Wettersatelliten Metop – eine Anlehnung an die bekannten POES Satelliten der NOAA.

§ 635 So schön Disaster Monitoring im Interesse der Koordination von Hilfsbemühungen nach einer (Natur-)Katastrophe ist – Prävention wäre vielleicht eine Alternative. Das Disaster Monitoring ist natürlich insbesondere bei den Disastern von Interesse, die sich wie 9/11 weder in ihrer Art noch im Zeitpunkt des Auftretens voraus sagen lassen. Gegen diese lassen sich daher kaum Vorbereitungen treffen (weder langfristige strukturelle noch kurzfristige Evakuierungen), ja nicht einmal sinnvolle Einsatzpläne erstellen. Viele anderen Disaster dagegen sind im Prinzip vorhersagbar und könnte auch abgewendet werden: Hurrikan Katrina ist ein Beispiel. Dass die Deiche von New Orleans einem Hurrikan dieser Stärke nicht standhalten werden, war bekannt. Es fehlten aber Geld und (politischer) Wille zur Prävention. Desgleichen gilt für viele auch der großen Städte, die auf Erdbebenspalten stehen oder in Flut gefährdeten Lagen – die Risiken sind bekannt, aber da die Prävention unbequem ist, beruhigt man sich mit exzellentem Disaster Management für den Fall der Fälle.

Literatur

§ 636 Einen nahezu vollständigen Überblick über Instrumente zur Erdfernerkundung bietet [134]. Ein weiteres gutes Hilfsmittel ist CEOS Earth Observation Handbook [276]: es enthält

u.a. eine aktuelle Liste nahezu aller ziviler Satelliten (inkl. Orbit Informationen, Start und Missionsende oder geplantem Start) sowie eine Liste der Instrumente – mit Hyperlinks. Auch JAXA stellt unter [386] viele Informationen über Satelliten, Instrumente und Messprinzipien zur Verfügung. Und die NASA betreibt im NSSDC einen Server [505], auf dem sich die einzelnen Satelliten und Instrumente in einer Kurzbeschreibung finden lassen – häufig gibt es auch Verweise auf andere Quellen und Ergebnisse. Falls garnichts auffindbar, hilft bei einem aktiven Satelliten möglicherweise die Liste der UCS [692]; falls der Startzeitpunkt (oder die Zeit des Absturz) bekannt auch das SpaceWarn Bulletin [615].

§ 637 Die wesentlichen Grundlagen zur Anwendung und Funktionsweise von Sensoren auf Satelliten finden sich in Rees [198], Sabins [209], Cracknell und Hayes [41], Curran [43] und Löffler [154]. Kitchin [129] beschreibt Sensoren allgemein, dort ist insbesondere der Abschnitt über die photographische Emulsion gut. Die Instrumente der nächsten Generation sind kurz in Baker [10] beschrieben, ansonsten in verschiedenen NASA-Publikationen unter dem Obertitel ‘Earth System Science’. Einige Instrumente oder Instrumenttypen sind auch in Rycroft [208] beschrieben. Die Seiten der Entwickler/Betreiber der Instrumente helfen häufig auch weiter.

Fragen

Frage 29 Welche der folgenden Satelliteninstrumente können Sie zur Begutachtung von Vegetation verwenden:

- konventioneller Schwarz-Weiß-Film
- konventioneller Farbfilm
- Multispektralscanner im sichtbaren Bereich
- IR-Farbfilm
- Thermischen IR-Scanner
- Multispektralkamera (konventionelle Filme)
- Multispektralscanner mit Kanälen im nahen IR
- IR-Schwarz-Weiß-Film
- Mikrowellenradiometer

Frage 30 In der Frühzeit der (bemannten) Erdfernerkundung wurde mit Multispektralkameras gearbeitet. Erklären Sie das Prinzip. Was sind Vor- oder Nachteile gegenüber einer Aufnahme mit einem Farbfilm?

Frage 31 Erläutern Sie den Unterschied zwischen einem konventionellen und einem IR-Farbfilm. Wozu werden IR-Farbfilme verwendet? Wie werden die Informationen dargestellt (IR ist nicht sichtbar!)?

Frage 32 Erläutern Sie, warum Multispektralinformationen für die Erdfernerkundung interessant sind.

Frage 33 Skizzieren Sie den Aufbau eines photographischen Systems, erläutern Sie den Begriff des Bodenaufklärungsvermögens und geben sie eine Beziehung zwischen Bodenaufklärungsvermögen, Brennweite, Flughöhe und dem Auflösungsvermögen des Films.

Frage 34 Beim Farb-IR-Film verzichtet man auf eine der konventionellen Farbschichten und verwendet stattdessen eine Schicht, die IR-empfindlich ist. Auf welche Schicht verzichtet man und warum?

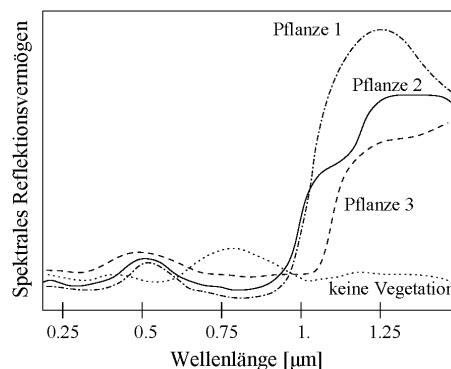
Frage 35 Welche der folgenden Parameter beeinflussen das Bodenaufklärungsvermögen eines optischen Systems:

- Flughöhe
- Filmkantenlänge
- Filmaufklärungsvermögen

- Brennweite des Objektivs
- Öffnung des Objektivs
- verwendeter Film (S/W oder Farbe)
- Wellenlänge
- Blickwinkel des optischen Systems
- Abstand Objektiv–Filmebene

Frage 36 Verwendet man ein LandSat Instrument (Flughöhe 900 km) auf einem militärischen Späher (Flughöhe 180 km), so verändern sich das Blickfeld und das Bodenaufklärungsvermögen. Wie?

Frage 37 Das spektrale Reflektionsvermögen verschiedener Pflanzen und Nicht-Vegetation ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Wie würden Sie vier Spektralkanäle wählen (bitte in Abbildung markieren), um Vegetation möglichst sicher identifizieren und zumindest ansatzweise auch klassifizieren zu können.



Frage 38 Welche Faktoren verschlechtern das Bodenaufklärungsvermögen?

Frage 39 Geben Sie die charakteristischen Größen (Auflösungsvermögen) eines optischen Systems an und charakterisieren Sie diese kurz

Frage 40 Der Wunsch nach einem hohen Bodenaufklärungsvermögen ist bei einem Erdfernerkundungsinstrument zumindest aus Sicht der Kartographen verständlich. Warum interessieren sich viele Anwender auch für ein gutes spektrales Auflösungsvermögen?

Frage 41 Welche der folgenden Probleme können unter Verwendung eines im thermischen Infrarot arbeitenden Instruments untersucht werden:

- Identifikation von 'Wärmeverschmutzern' (Kraftwerke, Autobahnen etc.)
- Unterscheidungen verschiedener Vegetationsformen und Pflanzengesundheit
- Unterscheidung verschiedener Gesteinsarten
- Bestimmung der Wolkenbedeckung
- Identifikation unterirdischer Wasserläufe oder -lager
- Bestimmung der Wolkenhöhe
- Beobachtung von Atmosphäre–Ozean–Wechselwirkung wie El Niño

Frage 42 Erläutern Sie die Kehrbesentechnik. Was sind die Vorteile gegenüber einem konventionellen photographischen System?

Frage 43 Skizzieren und beschreiben Sie die wesentlichen Elemente eines Multi-Spektralscanners (Hinweis: es gibt verschiedene Realisierungsformen, bitte eine relativ genau beschreiben, die anderen nur kurz).

Frage 44 Auf Thematic Mapper Aufnahmen von Landsat sind trotz eines Bodenaufklärungsvermögens von 30 m Strukturen mit einer Breite von nur wenigen Metern (Eisenbahnlinien, Molen u.ä.) deutlich zu erkennen. Erläutern Sie, möglichst mit Hilfe einer Skizze, warum.

Frage 45 Was ist ein Mixed Pixel? Wodurch wird sein Auftreten begünstigt? Haben Sie Vorschläge für Instrumententwickler, mit deren Hilfe das Auftreten von Mixed Pixels reduziert oder zumindest in der anschließenden Datenauswertung korrigiert werden kann?

Frage 46 Welche Messverfahren werden bei der Untersuchung der Atmosphäre (insbesondere Zusammensetzung und Spurengase) verwendet?

Frage 47 Erläutern Sie das Verfahren des Limb-Sounding.

Frage 48 Erläutern Sie das Messprinzip eines Ozonsensors, der vom Boden oder im Limb-Viewing eingesetzt werden kann. Welche physikalischen Grundprinzipien und -gleichungen gehen ein?

Frage 49 Welche Wellenlängenbereiche können sinnvoll zum Nachweis von Kohlendioxid in der Atmosphäre verwendet werden?

- UV
- weiches Röntgenlicht
- sichtbares Licht
- nahes Infrarot
- thermisches Infrarot
- Mikrowellen

Frage 50 In welchem Wellenlängenbereich sind Aerosol-Messungen sinnvoll und warum?

Frage 51 Welches Bodenaufklärungsvermögen haben Sensoren im thermischen Infrarot? Kann man das Bodenaufklärungsvermögen in den Bereich optischer Sensoren bringen? Begründen Sie.

Frage 52 Skizzieren Sie den Aufbau eines Infrarotscanners (thermisches IR) und beschreiben Sie das Funktionsprinzip.

Frage 53 Welche Größe wird von einem Infrarotscanner gemessen und wie wird sie anschließend interpretiert?

Frage 54 Erläutern Sie den Begriff der Effektivtemperatur. Geben Sie die relevante(n) Gleichung(en).

Frage 55 Welche Vor- und Nachteile haben passive Mikrowellendetektoren gegenüber optischen Instrumenten und Instrumenten, die im thermischen Infrarot arbeiten? Nennen Sie Anwendungsbeispiele.

Frage 56 Erläutern Sie, wie mit Hilfe eines aktiven Mikrowelleninstruments vom Satelliten aus die Wellenhöhe bestimmt werden kann.

Frage 57 Aus dem gemessenen Gesamtstrahlungsstrom lässt sich die Effektivtemperatur eines Körpers bestimmen. Steht diese in einer systematischen oder zufälligen Beziehung zu dessen realer Temperatur?

Aufgaben

Aufgabe 12 Auf dem Shuttle wurde für 'hübsche Bilder' die Earth Terrain Camera mit einer Brennweite von 450 mm und einem Mittelformatfilm mit 6 cm Kantenlänge verwendet (quadratisches Bild). Bestimmen Sie für eine Flughöhe von 400 km das Blickfeld auf dem Boden sowie das Bodenaufklärungsvermögen bei einer Filmempfindlichkeit von 300 Linien/mm.

Aufgabe 13 Ein leichtes Teleobjektiv einer Standard-Spiegelreflexkamera hat eine Brennweite von 100 mm und eine Blendenöffnung von 5 cm. Für ein mittleres λ von $5 \cdot 10^{-5}$ cm ist der Durchmesser des Beugungsscheibchens in der Filmebene zu bestimmen. Ist es sinnvoll, in dieser Kamera einen Film mit einem Auflösungsvermögen von 500 Linien/mm einzusetzen?

Aufgabe 14 Sie haben ein Teleobjektiv mit einer Brennweite von 500 mm und einen Film mit einem Auflösungsvermögen von 500 Linien/mm. Welche Öffnung sollte das Objektiv haben, damit Sie auch im nahen IR ($\lambda = 1 \mu\text{m}$) ein maximales Bodenauflösungsvermögen erhalten?

Aufgabe 15 Auflösungsvermögen (Hubble verkehrt): Aufgrund der äußeren Abmessungen amerikanischer Spionagesatelliten wird manchmal spekuliert, dass diese Satelliten mit einem Instrument ähnlich dem Hubble-Space-Teleskop ausgestattet sind – nur mit dem Unterschied, dass das Instrument zur Erde blickt. Das Teleskop hat eine Brennweite von 6 m. (a) Bestimmen Sie das Bodenauflösungsvermögen für den Fall, dass das Instrument (i) mit einem CCD aus einer Digitalkamera (ca. 2500 mal 2000 Pixel) betrieben wird oder (ii) mit einem konventionellen Film mit einer Auflösung von 500 Linien/mm (ebenfalls als Kleinbild-Film mit Maßen 36 mm mal 24 mm). Diskutieren Sie jeweils für eine militärische Flughöhe von 250 km und eine zivile Flughöhe von 900 km. (b) Welche Blendenöffnung muss das Teleskop für die verschiedenen Konfigurationen mindestens haben? (c) Wie groß ist der auf einem Bild abgebildete Bodenbereich jeweils? (d) Wieviele Orbits vergehen, bis das Gebiet erneut überflogen wird? (e) Welche Zeit steht maximal für eine Aufnahme zur Verfügung? (f) Wie groß ist die Verringerung des Auflösungsvermögens durch die Eigenbewegung des Satelliten bei einer Belichtungszeit von $1/500 \text{ s}$? (g) Lässt sich dieser Störeinfluss verringern?

Aufgabe 16 Der Thematic Mapper auf LandSat scannt einen 185 km breiten Streifen auf dem Boden mit einem Bodenauflösungsvermögen von 30 m ab. Wieviel Zeit steht für einen Streifen zur Verfügung und wie schnell muss der Spiegel (beidseitig beschichtet) rotieren? Wie groß ist die Belichtungszeit für ein einzelnes Pixel? Eine Szene hat eine Länge von 170 km (bei der Streifenbreite von 185 km). Wieviele Pixel hat eine Szene? Wie lange dauert die Aufnahme einer vollständigen Szene?

Aufgabe 17 Der französische Fernerkundungssatellit SPOT fliegt in einem nahezu kreisförmigen Orbit in einer Höhe von 832 km. Bestimmen Sie die Bahngeschwindigkeit des Satelliten und die Geschwindigkeit, mit der er seine Bodenspur abscannt. Welche Auswirkungen hat die Bodengeschwindigkeit auf Aufnahmen.

Aufgabe 18 Sie haben einen Satelliten, auf dem eine Videokamera mit einem Blickwinkel von 1° montiert ist. Ihr Ziel ist es, die gesamte Erdoberfläche zu filmen. Welche Inklination müssen Sie wählen? Bestimmen Sie die Zahl der benötigten Umläufe in Abhängigkeit von der Flughöhe. Diskutieren Sie die Vor- und Nachteile besonders niedriger oder hoher Orbits.

Aufgabe 19 Der Multispectralscanner MSS auf LandSat tastet bei einer Spiegeldrehung einen 476 m breiten Bereich quer zur Flugrichtung ab. Um ein Bodenauflösungsvermögen von 79 m zu kommen, wird dieser Streifen in jedem Wellenlängenband auf 6 CCD-Elemente abgebildet. Die Breite des abgetasteten Bereichs senkrecht zur Flugrichtung beträgt 185 km. Bestimmen Sie die Rotationsfrequenz des Spiegels (beidseitig reflektierend). Welche Zeit steht für die Aufnahme eines einzelnen Pixels zur Verfügung (die Pixel sind quadratisch)? Vergleichen Sie diesen Wert mit dem Wert, der sich ergäbe würde, wenn pro Spektralkanal nur ein CCD-Element zur Verfügung stehen würde.

Aufgabe 20 Berechnen Sie den Gesamtstrahlungsstrom, den ein Körper mit einer Temperatur von 35°C und einer Emissivität von 0.95 emittiert ($\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$). Welche Effektivtemperatur hat dieser Körper?

Aufgabe 21 Die Erde hat eine Effektivtemperatur von 255 K und emittiert Infrarotstrahlung im Bereich zwischen 3 und $100 \mu\text{m}$. Bei welcher Wellenlänge liegt das Maximum der terrestrischen Infrarotstrahlung? Scanner im thermischen Infrarot nutzen nur einen Bereich zwischen 3.5 und $5.5 \mu\text{m}$ sowie zwischen 8 und $14 \mu\text{m}$. Warum?

Aufgabe 22 Auf der Nordsee schwimmt ein dünner Ölfilm. Wasser und Ölfilm haben eine Temperatur von 20°C ; Wasser hat eine Emissivität von 0.993, ein Ölfilm auf Wasser eine von

0.972. Wie gut sollte das thermische Auflösungsvermögen eines Infrarotscanners mindestens sein, um den mit Ölfilm verschmutzten Bereich der Nordsee von der sauberen Nordsee zu unterscheiden?

Aufgabe 23 Beurteilen Sie, ob man von einem militärischen Aufklärungssatelliten aus die Schlagzeile der Bild oder Prawda lesen kann (Hinweis: die größten annehmbaren Brennweiten sind 6 m, das Filmauflösungsvermögen kann maximal 500 Linien/mm betragen). Welchen Öffnungsdurchmesser würden Sie benötigen? Die Flughöhe kann mit 200 km abgeschätzt werden.

Aufgabe 24 Bestimmen Sie das Bodenauflösungsvermögen Ihres Auges, wenn Sie sich als Beobachter auf einem der LandSat-Satelliten befinden würden (Flughöhen in Tab. ??) und vergleichen Sie mit dem Auflösungsvermögen des TM oder MSS. Hinweis zum Auge: Die Rezeptoren haben einen Durchmesser von $4 \mu\text{m}$, die 'Bildweite' des Auges beträgt 20 mm, die effektive Weite einer Rezeptorzelle ist $4/20000$ oder $1/5000$ der Bildweite [209]. Welche Rezeptorgröße würden Sie benötigen, um ein dem TM vergleichbares Bodenauflösungsvermögen zu erreichen? Ist dieser Wert sinnvoll? In welchem Bereich des elektromagnetischen Spektrums müssten Sie dann 'sehen'?

Aufgabe 25 Der oszillierende Spiegel des TM vollendet 14 Scans während einer Sekunde. Welche Zeit wird dabei für ein einzelnes Pixel aufgewendet? Vergleichen Sie mit den Verschlusszeiten normaler Kameras.

Beispiele für Missionen

Zum ersten mal in meinem Leben sah ich den Horizont als gebogene Linie. Sie war durch eine dunkelblaue dünne Naht betont – unsere Atmosphäre. Offensichtlich handelt es sich hierbei nicht um das Luftmeer, wie man mir oft in meinem Leben erzählte. Die zerbrechliche Erscheinung versetzte mich in Schrecken.

Ulf Merbold

§ 638 In diesem Kapitel werden einige ausgewählte Missionen zur Erdfernerkundung vorgestellt. Dabei werden Klassiker wie die LandSat und NOAA-Satelliten ebenso berücksichtigt wie Europas modernster Erdfernerkundungssatellit EnviSat und einige eher unbekanntere Missionen wie CHAMP. Außerdem werfen wir einen Blick auf NASA's ambitioniertes Mission to Planet Earth-Programm, das uns bereits die lange Wunschliste in Abschn. 3.6 beschert hat.

§ 639 Eine recht aktuelle und ausführliche Übersicht über Erdfernerkundungssatelliten mit den anklickbaren Links sowie einer Übersicht von Instrumententypen und Fragestellungen liefert Wikipedia unter [726]; weniger komfortabel aber umfassender ist die UCS-Liste [692].

4.1 Der klassische Geograph: LandSat

§ 640 Angefangen hat alles mit Bildern aus der Luft. Und der klassische zivile Vertreter in diesem Bereich ist LandSat – auch wenn es neuere und auch kommerzielle Missionen wie Ikonos, QuickBird, GeoEye oder SPOT gibt, bleibt LandSat der Vorteil, dass seine (relativ homogene) Datenbasis am weitesten zurück reicht. Letzteres ist für alle Untersuchungen bezüglich global change vorteilhaft; daher auch die Diskussion über LDCM [424, 708, 709].

§ 641 LandSat ist ein US-amerikanisches Satellitenprogramm. Das LandSat-Programm hat ursprünglich aus einer Mischung aus technologischen Zielen und kontinuierlicher Erdbeobachtung bestanden. 1983 ging das System von der NASA auf die NOAA über, seitdem hat der technologische Aspekt nur geringe Bedeutung und das Schwergewicht liegt auf der kontinuierlichen Erdbeobachtung. Die wesentlichen Merkmale der LandSat-Satelliten sind in Tab. 4.1 zusammen gefasst. Eine Übersicht über alle LandSat-Satelliten inklusive ihrer Instrumentierung findet sich auf der LandSat Homepage der NASA [407]. Diese Seite liefert auch Informationen über den Zustand der einzelnen Satelliten und der Instrumente; so ist Anfang 2008 LandSat 7 der LandSat und LandSat 5 die Reserver zum Erhalt der Kontinuität der MSS-Daten.

S/C	S/C Launch	Sensor Completion	Data Resolution (m)	Data Communications	Orbital Altitude	S/C Operator(s)	End of Service/ Status
LS-1 (ERTS)	Jul. 23, 1972	RBV MSS, DCS	80 80	DD (Direct Downlink) 2 WBVTR	907 km	NASA	Jan. 6, 1978
LS-2	Jan. 22, 1975	RBV MSS,DCS	80 80	DD with 2 WBVTR	908 km	NASA	1983
LS-3	Mar. 5, 1978	RBV MSS,DCS	30 80	DD with 2 WBVTR	915 km	NASA	Jan. 7, 1983
LS-4	Jul. 16, 1982	MSS TM, GPS	80 30	DD TDRSS	705 km	NOAA ('83)/ Eosat ('85)	standby Dec. 1993
LS-5	Mar. 1, 1984	MSS TM, GPS	80 30	DD TDRSS	705 km	NOAA ('84)/ Eosat ('85)	operational as of 2001
LS-6	Oct. 5, 1993	ETM	15 (PAN) 30 (MS)	DD with re- corders	launch failure (contact lost during launch)		
LS-7	Apr. 15, 1999	ETM+	15 (PAN) 30 (MS)	DD with re- corders	705 km	NOAA	

Tabelle 4.1: Übersicht über die LandSat Satelliten [134]

§ 642 Der erste LandSat-Satellit wurde 1972 unter dem Namen ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite) gestartet, später in LandSat 1 [534] umbenannt. Die experimentellen technologischen Aspekte dieses Satelliten waren seine Verwendung einer Videokamera (RBV [565], später nur für planetare Missionen verwendet, nicht jedoch in der Erdfernerkundung) und des Prototyps des Multispektralscanners MSS [552].

§ 643 LandSat 2 [535] und 3 [536] folgten 1975 bzw. 1978 mit ähnlicher Ausstattung, ihre Bilder begegnen uns in verschiedenen älteren Atlanten. Während LandSat 2 über die gleiche Instrumentierung verfügte wie LandSat 1, war auf LandSat 3 die dreifach RBV (Multispektral-RBV) durch eine panchromatische Doppel-RBV (siehe auch Abb. 3.38 und [567]) mit besserer Bodenaufklärung ersetzt. Auf LandSat 4 [537] und 5 [538], gestartet 1982 bzw. 1984, wurde die Videokamera RBV durch den Thematic Mapper TM [593, 594] ersetzt, außerdem verfügten beide über ein, allerdings dem DoD Programm unterstelltes, GPS-System. Auch fliegen beide in einem niedrigeren Orbit: durch die größere Streifenbreite und die geringere Umlaufzeit verringert sich die Wiederholfrequenz des Überflugs von 18 auf 16 Tage. Die Orbits sind bei allen LandSats sonnensynchron.

§ 644 1995 ging LandSat 6 während des Starts verloren: zwar wurde er von der Rakete in ein niedriges Orbit eingetragen, nach dem Zünden der Booster zum Übergang auf ein Transfer-Orbit ging jedoch der Kontakt verloren. Da auch keine Radarechos des Satelliten oder seiner Trümmer gefunden werden konnten, vermutet man, dass die Lagekontrolle nicht funktioniert hat und LandSat von seinen Booster in einen Ozean katapultiert wurde.

§ 645 1999 wurde als Ersatz LandSat 7 [539] gestartet. Dieser trägt als Neuerung den Enhanced Thematic Mapper Plus ETM+ [486, 516] als eine Kombination aus altem TM und MSS mit deutlich verbessertem Bodenaufklärungsvermögen.¹ Die sieben Spektralkanäle sind denen des TM ähnlich, ein zusätzlicher panchromatischer Kanal ermöglicht das hohe Bodenaufklärungsvermögen (der Ansatz ist von der Kombination von RBV und MSS auf LandSat 3 und später auch von SPOT bekannt). Die Instrumentdaten sind mit denen von MSS und TM in Tabelle 4.2 zusammen gefasst, ein Beispiel für ein ETM+-Bild ist in Abb. 3.52 gegeben. Die wichtigsten Informationen über LandSat 7 finden sich auf der LandSat 7 Homepage der NASA unter [485], Informationen über den Enhanced Thematic Mapper ETM+ unter [714], eine Kurzdarstellung in § 411ff.

§ 646 Während für die ersten LandSat Satelliten neben der Instrumenterprobung Kartographie und Geländeklassifikation wichtigste Aspekte der Missionen waren, ist für die jüngsten

¹Das ETM+ entsteht daraus, dass die Idee eigentlich schon als ETM auf LandSat 6 realisiert war und das Instrument auf LandSat 7 eine Verbesserung dieses ETM ist. Da es auf Grund des LandSat 6 Verlustes nie ETM-Bilder gegeben hat, wird bei Datenprodukten manchmal nicht ganz genau zwischen ETM und ETM+ unterschieden: wenn nur ETM draufsteht, ist es entweder eine Simulation oder wahrscheinlicher ETM+.

Landsat sensor	MSS (LS-1-5)	TM (LS-4/5)	ETM (on LS-6)	ETM+ (on LS-7)
Spectral bands (all bands in μm)	1) 0.5 - 0.6 2) 0.6 - 0.7 3) 0.7 - 0.8 4) 0.8 - 1.1	1) 0.45 - 0.52 VNIR 2) 0.52 - 0.60 VNIR 3) 0.63 - 0.69 VNIR 4) 0.76 - 0.90 VNIR 5) 1.55 - 1.75 SWIR 7) 2.08 - 2.35 SWIR 6) 10.4 - 12.5 TIR	P) 0.52 - 0.90 VNIR 1) 0.45 - 0.52 VNIR 2) 0.52 - 0.60 VNIR 3) 0.63 - 0.69 VNIR 4) 0.76 - 0.90 VNIR 5) 1.55 - 1.75 SWIR 7) 2.08 - 2.35 SWIR 6) 10.4 - 12.5 TIR	P) 0.52 - 0.90 VNIR 1) 0.45 - 0.52 VNIR 2) 0.53 - 0.61 VNIR 3) 0.63 - 0.69 VNIR 4) 0.78 - 0.90 VNIR 5) 1.55 - 1.75 SWIR 7) 2.09 - 2.35 SWIR 6) 10.4 - 12.5 TIR
Swath width	185 km	185 km	185 km	185 km
Spatial resolution	80 m	30 m VNIR/SWIR 120 m TIR	15 m PAN, 30 m VNIR/SWIR, 120 m TIR	15 m PAN 30 m VNIR/SWIR 60 m TIR
Radiometric resolution	6 bit	8 bit	9 bit (8 bit transmitted)	9 bit (8 bit transmitted)
Band-to-band registration		0.2 pixel (90%)	0.2 pixel (90%)	0.2 pixel (90%)
Geodetic accuracy without ground control		500 m (90%)	1000 m (90%)	400 m (90%)
Data rate	15 Mbit/s	85 Mbit/s	2 x 85 Mbit/s	2 x 75 Mbit/s
Instrument mass	64 kg	258 kg	288 kg scanner, plus 81 kg AEM	318 kg scanner, plus 103 kg AEM, plus 20 kg cable harness
Average power	50 W	332 W	490 W	590 W
Telescope aperture	23 cm	40.6 cm	40.6 cm	40.6 cm

Tabelle 4.2: Charakteristika der LandSat-Instrumente MSS, TM und ETM+ [134]

LandSat-Vertreter das Monitoring, d.h. die kontinuierliche Beobachtung, ein wichtiger – wahrscheinlich der wichtigste – Aspekt. Gerade für alle den global change betreffende Fragen ist eine langandauernde, kontinuierliche Datenbasis erforderlich. Daher wurde LandSat 5 nicht abgeschaltet sondern wird parallel zu LandSat 7 betrieben, da LandSat 5 der letzte Satellit ist, der einen MSS trägt. Und es wird die LCDM diskutiert.

§ 647 Interessant ist auch das Ersatzinstrument für den MSS auf LandSat 7: der High Resolution Multispectral Imager HRMSI [525, 704] hat 4 Spektralkanäle im Bereich zwischen 0.55 und 0.9 μm mit einem Auflösungsvermögen von 10 m, sowie zusätzlich einen panchromatischen Kanal mit einem Bodenauflösungsvermögen von 5 m. Die Stereo Kapazität wird durch einen Blick zur Seite erreicht, das Verfahren ist ähnlich dem auf SPOT verwendeten. Aufgerieben wurde das Instrument anscheinend in einem der zivil-militärisch Schirmmützel [59].

§ 648 Der frühere klassische Geograph wie eben LandSat wird heute zwar immer noch für Monitoring Aufgaben weiter verwendet. Die Photo-Missionen sind jedoch spätestens seit SPOT [676] kommerziell interessant geworden, wie Ikonos, QuickBird oder GeoEye und andere Satelliten zeigen. Einige Beispiele inkl. der von ihnen erzeugten Produkte sind unter [374] gegeben; Abb. 4.1 zeigt als weiteres Beispiel eine aktuellere Variante von Abb. 1.7. Und neben der Kommerzialisierung des Imaging gibt es auch den Public Domain Ableger, ein Beispiel ist Google Earth.

4.2 Ein Meteorologe: MeteoSat

§ 649 MeteoSat [362] ist das Wettersatellitenprogramm der ESA. Es wurde 1972 ins Leben gerufen, der erste Satellit MeteoSat 1 wurde 1977 in einen geostationären Orbit gebracht und arbeitete bis 1979. Sein Nachfolger, MeteoSat 2 war von 1981 bis 1988 aktiv und wurde 1991 in eine andere Position manöviert und von einem anderen Träger weiter betrieben. Der letzte Satellit der ersten Serie, MeteoSat 7, wurde 1997 gestartet. Der erste Satellit der zweiten Serie, MeteoSat 8, wurde im Januar 2004 in Betrieb genommen.

§ 650 Die MeteoSat Satelliten sind spinstabilisiert mit 100 Umdrehungen pro Minute, die Spinachse steht senkrecht zur Bahnebene (Cartwheel, häufig bei Wettersatelliten verwendet,



Abbildung 4.1: Etwas aktuellere Version von Abb. 1.7 aus geringfügig größerer Flughöhe [663]

da keine Verschleiß-empfindlichen mechanisch beweglichen Teile vorhanden sind, zu deren Betrieb auch noch Energie benötigt wird). Die Rotation dient gleichzeitig zum Scannen. Da die Fragestellungen der Satelliten einfach sind, nämlich Wettervorhersage, verfügen sie einheitlich über ein relativ einfaches Instrument VISSR (Visible and Infrared Spin Scan Radiometer [489]), auch bezeichnet als MSR (Multispectral Radiometer) oder MVIR (Meteosat Visible and Infrared Radiometer). VISSR hat drei Kanäle: VIS zwischen 0.5 und $0.9 \mu\text{m}$ für die Aufnahmen im sichtbaren Bereich, wie sie uns bei der Wettervorhersage gezeigt werden, WV zwischen 5.7 und $7.1 \mu\text{m}$ detektiert die Emission von Wasserdampf, und TIR im Bereich von 10.5 – $12.5 \mu\text{m}$ misst im thermischen Infrarot. Das Bodenaufklärungsvermögen beträgt im VIS 2.5 km , in den beiden anderen Kanälen 5 km .

§ 651 Die Entwicklung der MSG (MeteoSat Second Generation) Satelliten führt zu keiner Änderung des Grundkonzepts, nämlich das Scannen mit der Stabilisierung des Spacecraft zu verbinden. VISSR wird ersetzt durch seine Erweiterung SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager [365]) mit insgesamt 12 Spektralbändern (5 im sichtbaren bzw. nahen IR, 2 für Wasserdampf und 5 im thermischen Infrarot). Zusätzlich werden die MSG Satelliten mit GERB (Geostationary Earth Radiation Budget [660]) um ein Instrument erweitert: die Messung der globalen Strahlungsbilanz ist sowohl zum Verständnis der Variationen der Solarkonstante als auch zum Verständnis von climate change erforderlich. Die Masse der Satelliten wird sich dadurch von 322 kg auf 2040 kg erhöhen, die Leistungsaufnahme auf 600 W ; MeteoSat-8 als erster Vertreter dieser neuen Generation wurde im Januar 2004 in Betrieb genommen.

§ 652 Eine vollständige Übersicht über MeteoSat-8 mit Informationen auch zu seinen Vorgängern, findet sich auf der Seite seines Betreibers EuMetSat [362]. NOAA betreibt mit der GOES Serie ebenfalls geostationäre Wettersatelliten, ebenso wie einige andere Nationen, siehe z.B. Abb. 2.20.

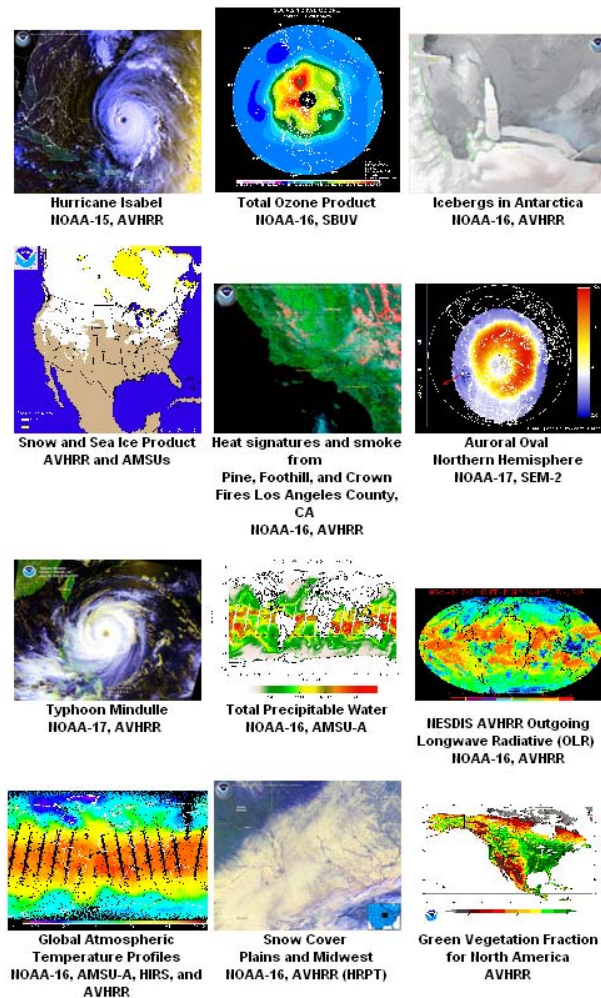


Abbildung 4.2: POES – ein Alleskönner, wie die Werbung der NASA nahe legt [427]

4.3 Ein tiefer gelegter Meteorologe: TIROS bis POES

§ 653 Einen anderen Ansatz verfolgt das US-amerikanische meteorologische Programm TIROS (Television Infrared Observation Satellite [588, 591, 445, 470]): statt geostationärer Orbits werden hier Satelliten in niedrigen polaren Orbits verwendet. Durch ein gegenüber Kartographie-Satelliten deutlich reduziertes Bodenaufklärungsvermögen haben die Instrumente ein großes Blickfeld und damit eine für die Wettervorhersage ausreichende Wiederholrate.

§ 654 Dieses Programm besteht eigentlich aus mehreren Serien von Satelliten, die jeweils aus ihren Vorgängern entwickelt wurden. Diese Satelliten tragen neben den klassischen Instrumenten zur Meteorologie auch weitere Instrumente für umweltbezogene Fragestellungen. Am bekanntesten ist vielleicht das AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer, siehe auch § 414ff) auf den POES-Satelliten, das ähnlich den MSS- und TM-Instrumenten ein sehr gutes Universalinstrument ist. Die verschiedenen Satelliten und Serien sind in Tabelle 4.3 zusammen gefasst.

§ 655 Die von den POES Satelliten angebotenen Produkte liegen, wie bereits bei der Beschreibung des AVHRR in § 415 angedeutet, nicht in der Kartographie sondern in großräumigeren, vielfach auch mit Wasser verbundenen Phänomenen. Zusammen mit anderen Instrumenten liefert POES die in Abb. 4.2 gegebene Produktpalette:

- vom AVHRR gibt es neben den klassischen Wetterbildern (insbesondere natürlich die

Satellite Name	Launch Date	Period (min)	Perigee (km)	Apo-gee (km)	Inclin. (°)	Remarks/Sensor Complement
TIROS-1	01 Apr 60	99.2	796	867	48.3	1 TV-WA and 1 TV-NA
TIROS-2	23 Nov 60	98.3	717	837	48.5	1 TV-WA, 1 TV-NA, passive & active IR scan
TIROS-3	12 Jul 61	100.4	854	937	47.8	2 TV-WA, HB, IR, IRP
TIROS-4	08 Feb 62	100.4	817	972	48.3	1 TV-WA, IR, IRP, HB
TIROS-5	19 Jun 62	100.5	680	1119	58.1	1 TV-WA, 1 TV-MA
TIROS-6	18 Sep 62	98.7	783	822	58.2	1 TV-WA, 1 TV-MA
TIROS-7	19 Jun 63	97.4	713	743	58.2	2 TV-WA, IR, ion probe, HB
TIROS-8	21 Dec 63	99.3	796	878	58.5	1st APT TV direct readout & 1 TV-WA
Nimbus-1	28 Aug 64	98.3	487	1106	98.6	3 AVCS, 1 APT, HRIR, three-axis stabilization
TIROS-9	22 Jan 65	119.2	806	2967	96.4	First "wheel," 2 TV-WA, global coverage
TIROS-10	02 Jul 65	100.6	848	957	98.6	Sun synchronous, 2 TV-WA
ESSA-1	03 Feb 66	100.2	800	965	97.9	1st operational system, 2 TV-WA, FPR
ESSA-2	28 Feb 66	113.3	1561	1639	101.0	2 APT, global operational APT
Nimbus-2	15 May 66	108.1	1248	1354	100.3	3 AVCS, HRIR, MRIR, APT
ESSA-3	02 Oct 66	114.5	1593	1709	101.0	2 AVCS, FPR
ATIS-1	06 Dec 66	24 hr	41,257	42,447	0.2	SSCC (Spin Scan Cloudcover Camera)
ESSA-4	26 Jan 67	113.4	1522	1656	102.0	2 APT
ESSA-5	20 Apr 67	113.5	1556	1635	101.9	2 AVCS, FPR
ATIS-3	05 Nov 67	24 hr	41,166	41,222	0.4	MSSCC (Multicolor Spin scan Cloud Camera)
ESSA-6	10 Nov 67	114.8	1622	1713	102.1	2 APT TV
ESSA-7	16 Aug 68	114.9	1646	1691	101.7	2 AVCS, FPR, S-band
ESSA-8	15 Dec 68	114.7	1622	1682	101.8	2 APT TV
ESSA-9	26 Feb 69	115.3	1637	1730	101.9	2 AVCS, FPR, S-band
Nimbus-3	14 Apr 69	107.3	1232	1302	101.1	HRIR, IRIS, MRIR, MUSE, SIRS, IDICS, IRLS, 2 APT, 2 AVCS, 2 SR, FPR, three-axis stabilization
ITOS-1	23 Jan 70	115.1	1648	1700	102.0	SIRS B, IRIS, SCR, THIR, , FWS, IDCS,
Nimbus-4	15 Apr 70	107.1	1200	1280	99.9	IRLS, MUSE, BUW
NOAA-1	11 Dec 70	114.8	1422	1472	102.0	2 APT, 2 AVCS, 2 SR, FPR
NOAA-2	15 Oct 72	114.9	1451	1458	98.6	2 VHRR, 2 VTPR, 2 SR, SPM
Nimbus-5	11 Dec 72	107.1	1093	1105	99.9	SCMR, ITPR, NEMS, ESMR, THIR
NOAA-3	06 Nov 73	116.1	1502	1512	101.9	2 VHRR, 2 VTPR, 2 SR, SPM
SMS-1	17 May 74	1436.4	35,605	35,975	0.6	VISSR, DCS, WEFAX, SEM (EPS,MAG,XRS)
NOAA-4	15 Nov 74	101.6	1447	1461	114.9	2 VHRR, 2 VTPR, 2 SR, SPM,
SMS-2	06 Feb 75	1436.5	35,482	36,103	0.4	VISSR, DCS, WEFAX, SEM
Nimbus-6	12 Jun 75	107.4	1101	1115	99.9	ERB, ESMR, HIRS LRIR, T+DRE, SCAMS, THIR TWERLE, PMR
GOES-1	16 Oct 75	1436.2	35,728	35,847	0.8	VISSR, DCS, WEFAX, SEM (EPS,MAG,XRS)
NOAA-5	29 Jul 76	116.2	1504	1518	102.1	2 VHRR, 2 VTPR, 2 SR, SPM
GOES-2	16 Jun 77	1436.1	35,600	36,200	0.5	VISSR, DCS, WEFAX, SEM (EPS,MAG,XRS)
GOES-3	15 Jun 78	1436.1	35,600	36,200	0.5	VISSR, DCS, WEFAX, SEM (EPS,MAG,XRS)
TIROS-N	13 Oct 78	98.9	849	864	102.3	AVHRR, HIRS/2, SSU, MSU, HEPAD, MEPED, TED
Nimbus-7	24 Oct 78	99.3	943	955	104.1	LIMS, SAMS, SAM-II, SBUV/IOMS, „ERB SMMR, THIR, CZCS, SMMR
NOAA-6	27 Jun 79	101.3	807.5	823	98.7	AVHRR, HIRS/2, SSU, MSU, HEPAD, MEPED, TED
GOES-4	09 Sep 80	1436.1	35,600	35,600	0.5	VAS, DCS, SEM (EPS,MAG,XRS,HEPAD), WEFAX
GOES-5	22 May 81	1436.1	35,600	35,600	0.5	VAS, DCS, SEM (EPS,MAG,XRS,HEPAD), WEFAX
NOAA-7	23 Jun 81	101.9	852	869	98.9	AVHRR, HIRS/2, SSU, MSU, HEPAD, MEPED, TED
NOAA-8	28 Mar 83	101.2	801	826	98.2	AVHRR, HIRS/2, SSU, MSU, MEPED, TED, S&R
GOES-6	28 Apr 83	1436.1	35,803	35,771	0.1	VAS, DCS, WEFAX, SEM (EPS,MAG,XRS)
ERBS	05 Oct 84	96.8	393	608	57	ERBE, SAGE-II
NOAA-9	12 Dec 84	102.0	842	862	98.9	AVHRR, (HIRS/2, SSU, MSU)=TOVS, S&R, SBUV/2, ERBE,
NOAA-10	17 Sep 86	101.3	803	824	98.7	AVHRR, (HIRS/2, SSU, MSU)=TOVS, MEPED, TED, S&R, SBUV, ERBE,
GOES-7	26 Feb 87	1436.1	35,759	35,826	0.1	VAS, DCS, WEFAX, SEM (EPS,MAG,XRS), S&R
NOAA-11	24 Sep 88	102.1	845	863	98.9	AVHRR, (HIRS/2, SSU, MSU)=TOVS, S&R, SBUV/2,
NOAA-12	14 May 91	101.3	806	825	98.7	AVHRR, HIRS/2, MSU, SEM (MEPED, TED)
NOAA-13	09 Aug 93	a S/C failure (power loss) occurred on Aug. 21, 1993				AVHRR, TOVS, SBUV, SEM, ARGOS, S&R, EHIC, MAXIE
GOES-8	13 Apr 94	Geosynchronous orbit				Imager, Sounder, SEM, DCS, Wefax, S&R
NOAA-14	30 Dec 94	102.1	847.7	860.8	98.9	AVHRR, SBUV/2, HIRS/2I, MSU, SSU, SEM, ARGOS (DCS), S&R
GOES-9	23 May 95	Geosynchronous orbit				Imager, Sounder, SEM, DCS, Wefax, S&R
NOAA-15	13 May, 98	101.3	803.7	817.8	98.70	AVHRR/3, HIRS/3, AMSU-A (A1+A2), AMSU-B, SEM-2, ARGOS (DCS-2), S&R
NOAA-16	21 Sept, 00	102.1	845.4	860.4	98.74	AVHRR/3, HIRS/3, AMSU-A (A1+A2), AMSU-B, SBUV/2, SEM-2, ARGOS (DCS-2), S&R

Tabelle 4.3: Übersicht amerikanischer Umwelt- und Wettersatelliten von TIROS bis NOAA (bzw. POES) [134]

großen Wirbel wie Hurrikan oder Taifun) Informationen über Schnee- und Eisbedeckung, Waldbrände, den bereits bekannten NDVI, auch als Greenes bezeichnet.

- atmosphärische Parameter wie die totale Ozonsäule von SBUV, die abgestrahlte langwellige Strahlung von NESDIS, der gesamte ausregenbare Wassergehalt der Atmosphäre von dem ebenfalls bereits bekannten AMSU (siehe auch § 561) sowie globale Temperaturprofile aus der Kombination verschiedener Instrumente, darunter auch HIRS.
- das Polarlichtoval und die Strahlenbelastung auf Flughöhe von SEM-2.

§ 656 Die erste Serie dieser Satelliten in polaren Orbits umfasst TIROS 1 bis TIROS 10. Die wichtigsten Instrumente sind Videokameras mit Weitwinkel (TV-WA) bzw. Tele (TV-NA). Diese wurden auf allen Satelliten der ersten TIROS-Serie geflogen, die Instrumente haben ein Blickfeld von $1200 \times 1200 \text{ km}^2$ bei einer Bodenaufösung von 2.5–3 km bzw. $120 \times 120 \text{ km}^2$ bei einer Auflösung von 0.3–0.8 km. Beide Videokameras arbeiten im panchromatischen Modus, Aufnahmen im thermischen Infrarot wurden erst mit dem Scanning Radiometer (SR [569], Masse 2 kg, Leistungsaufnahme 1 W) ab TIROS-2 möglich. Auf allen weiteren Satelliten der ersten Serie wurden neben den Videokameras weitere Instrumente geflogen, viele davon eher experimenteller Art.

§ **657** TIROS 9 ist der erste Cartwheel Meteorologiesatellit: bei ihm steht, wie bereits bei den MeteoSats erwähnt, die Spinachse senkrecht auf der Bahnebene, so dass die Spinbewegung gleichzeitig ein Scannen der Erdoberfläche ermöglicht. TIROS-9 und 10 waren gleichzeitig auch die Testsatelliten für die zweite Generation von Meteorologie-Satelliten: TOS (TIROS Operational Satellite [471]) oder ESSA (Environmental Science and Services Administration). Auch hier ist der Schwerpunkt die Beobachtung der Wolkenbedeckung und der Wettersysteme. Die Instrumentierung besteht aus dem AVCS (Advanced Vidicon Camera System [506]) mit einem Blickfeld von $1200 \times 1200 \text{ km}^2$ und einem Auflösungsvermögen von 3 km. Die weiteren Verbesserungen betrafen die technischen Details wie Datenspeicherung und Übertragung sowie das radiometrische Auflösungsvermögen. Ab TOS 3 (ESSA 3 [518]) wird zur Untersuchung der Strahlungsbilanz (reflektierte solare Einstrahlung) ein oder mehrere FPRs (Flat Plate Radiometer [520], 3 kg, 4 W) geflogen (da wird 1966 das begonnen, was die EuMetSat erst mit der zweiten MeteoSat-Generation angehen wird). Die Serie endet mit TOS 9.

§ **658** Ab 1970 wird von NOAA die Serie als ITOS (Improved TIROS Operational System [462]) betrieben, der erste Satellit NOAA 1 (auch ITOS-A, ITOS-1 oder TIROS M genannt) startet Ende 1970; heute wird häufiger die Bezeichnung POES verwendet statt NOAA. Neben dem Videosystem AVCS [506] und dem Radiometer FPRs wird auf diesen Satelliten eine Vielzahl anderer Instrumente geflogen, dazu gehören ein Solar Proton Monitor (SPM [576]), ein einfaches Scanning Radiometer (SR [570]) mit einem Kanal im Sichtbaren und einem im thermischen Infrarot und ab NOAA 2 auch VHRR (Very High Resolution Radiometer [600], 16 kg, 25 W), mit zwei Spektralbändern und einem Auflösungsvermögen von 0.87 km bei einer Streifenbreite von 2580 km.²

§ **659** Die nächste Generation ab TIROS N ist die vierte Generation, sie lebt auch heute noch mit NOAA 18 als ihrem aktuellsten Vertreter. Hier hat sich der Wettersatellit zum Umweltmonitor mutiert. Das bereits aus der ITOS-Serie bekannte VHRR wurde zum AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) weiterentwickelt, ein System TVOS (TIROS Operational Vertical Sounder [589]) von Soundern misst vertikale Profile von Druck, Temperatur und Wasserdampf von der Erdoberfläche bis zur Oberkante der Atmosphäre, und der Space Environment Monitor (SEM [577]) misst energiereiche Teilchen über einen weiten Energiebereich. Außerdem befasst sich ERBE (Earth Radiation Budget Experiment [513]) auf NOAA-9 und NOAA-10 mit der Strahlungsbilanz der Erde.

§ **660** AVHRR (siehe auch § 414) ist in der Abbildungsgeometrie VHRR vergleichbar und misst in 5 Kanälen; ein panchromatischer Kanal im sichtbaren für die Wolkenbedeckung (tagsüber) und Oberflächenkartierung, ein Kanal im nahen IR zur Identifikation von Oberflächengewässern und Vegetation, ein Kanal im atmosphärischen Fenster des IR bei $3.8 \mu\text{m}$ für die Temperatur der Meeresoberfläche und zum Nachweis von Feuern, und ein Kanal bei $11 \mu\text{m}$ für Meeresoberflächentemperaturen und nächtliche Wolkenbedeckung. Bei den ersten Versionen des AVHRR ist dieser Kanal doppelt vorhanden (Kalibrierung), bei den späteren Versionen ist er durch einen Kanal bei $12 \mu\text{m}$ ersetzt, mit dessen Hilfe Oberflächentemperaturen und Tag/Nacht-Unterschiede in der Wolkenbedeckung nachgewiesen werden können. Über das AVHRR gibt es verschiedene gute Dokumentationen, teilweise auch mit Datenbeispielen, z.B. [308, 309, 637, 638, 705, 710]. Viele Anwendungsbeispiele (auch aktuelle Daten) stellt die Uni Bern als JPEG-Dateien unter [695] (aktuelle Daten) und [669] (Beispiele für Anwendungen zu Fragen des global change) zur Verfügung. POES wird im Rahmen von NPOESS in veränderter Form und in Zusammenarbeit mit dem DoD weiter geführt.

²Das Grundkonzept von VHRR ist natürlich gar nicht so verschieden von dem von TM oder MSS auf LandSat, der wesentliche Unterschied liegt im Bodenauflösungsvermögen und in der Streifenbreite: LandSat ist für Kartographie und Detailklassifizierung gebaut, d.h. das Bodenauflösungsvermögen muss sehr gut sein, aber die Aufnahmezeit kann recht lang sein, da Berge und Kontinente eher stationär sind. VHRR dagegen betrachtet globale und relativ schnell veränderliche Prozesse wie Wolken, Wettersystem oder im thermischen IR Meeresströmungen. Deren Zeitskalen erfordern jedoch eine häufige Beobachtung während ihre räumlichen Skalen so groß sind, dass ein Auflösungsvermögen im Bereich von einigen zehn Metern übertrieben ist.

§ 661 Auch EuMetSat steigt unter dem Motto ‘Monitoring Weather, Climate and the Environment’ in das Geschäft mit den polaren Meteorologiesatelliten ein [363]. Von den drei geplanten Metop Satelliten wurde der Metop-A als der erste im Oktober 2006 gestartet. Er trägt 10 Experimente, die meisten von ihnen bereits bekannt. Von der NOAA übernommen wurde u.a. die AVHRR Kamera sowie der AMSU-A Mikrowellensounder, der HIRS Infrarotsounder, das ARGOS datensammelsystem und der von den Space Environment Monitor SEM-2. Die eigenen Instrumente sind mit dem GOME 2 Spektrometer [311] zur Ozonmessung ebenfalls teilweise bekannt. Neu sind das ASCAT Scatteometer zur Bestimmung von Windgeschwindigkeiten und -richtung, das IASI Spektrometer [315] zur Messung von Temperatur- und Feuchteprofilen, das GRAS GPS-Instrument zur Messung von atmosphärischen Dichteprofilen und das MHS Instrument [317] zur Messung von Feuchteprofilen mit Hilfe von Mikrowellen.

§ 662 Irgendwie klingt die Verwendung zweier Systeme, eines polaren und eines geostationären, nach Hochrüstung an der Wetterfront. Für die klassische Wettervorhersage im Sinne der Betrachtung großräumiger Phänomene in niedrigen und mittleren Breiten ist der klassische geostationäre Späher sicherlich ideal. Seine Nachteile sind das begrenzte Auflösungsvermögen auf Grund des großen Abstands und die Vernachlässigung polarer Gebiete. Ein besseres Bodenaufklärungsvermögen ist hilfreich, um sich ausbildende Wirbel frühzeitig identifizieren zu können; die Betrachtung der polaren Gebiete ist weniger für die tägliche Wettervorhersage relevant als vielmehr für Untersuchungen im Bereich global change:³ die Beobachtungen ebenso wie die Modelle legen nahe, dass die schnellsten und stärksten Veränderungen in hohen Breiten erfolgen. Diese sind aber umgekehrt der direkten Beobachtung am schlechtesten zugänglich, da es abgesehen von einigen Forschungsstationen in der Antarktis bzw. in einem Ring um die Arktis kein Messnetz gibt. Für global change ist neben diesem direkten Blick auf die Pole auch ein besseres Bodenaufklärungsvermögen als vom geostationären Orbit aus hilfreich.

4.4 Der Generalist für Umweltfragen: EnviSat

§ 663 Der bereits aus Abb. 1.10 bekannte EnviSat (Environmental Satellite [343]) ist ESA’s Schwergewicht (Gesamtmasse 8140 kg, Nutzlastmasse 2150 kg, 6.5 kW Spacecraft Power, 1.9 kW für die Nutzlast) in Sachen Umwelt. Die Nutzlast besteht aus 9 Instrumenten, die sich gegenseitig ergänzen und teilweise überlappen. Diese Überlappung ist u.a. notwendig zur Kalibrierung; teilweise erfolgt sie auch unbeabsichtigt, da jedes Instrument für sich alleine (z.B. bei Ausfall eines anderen Instruments oder bei Einsatz auf einem anderen Raumfahrzeug) die zur Untersuchung der wissenschaftlichen Fragestellungen notwendigen Daten liefern muss. Jedes Instrument ist spezifischen Fragestellungen angepasst. Die Homepage von EnviSat ist zu finden unter [343], die Dokumentationen zu den einzelnen Instrumenten sowie Broschüren zu EnviSat und seinen Instrumenten können über [75] und [354] erreicht werden.

§ 664 MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer, vgl. auch § 555) beobachtet zwischen $0.29 \mu\text{m}$ und $1.04 \mu\text{m}$ mit 15 Sampling-Intervallen, die ganz gezielt auf bestimmte Stoffe bzw. Fragestellungen angepasst sind, vgl. Tab. 4.4. Das Bodenaufklärungsvermögen beträgt $1040 \times 1200 \text{ m}^2$ über den Ozeanen bzw. $260 \times 300 \text{ m}^2$ über Land, die Aufnahme des Bildes erfolgt auf einem CCD-Array, d.h. das Instrument enthält keine bewegliche Komponente zum Scannen sondern bildet wieder wie beim Film auf eine Fläche ab. Die Kombination von mittlerem Bodenaufklärungsvermögen mit sehr gutem spektralem Auflösungsvermögen soll das Monitoring von Ozeanen, Atmosphäre und Land ermöglichen, insbesondere die Messung biophysikalischer und biochemischer Parameter der Ozeanoberfläche (Chlorophyll, Gelbstoff, gelöste Teilchen), die Beobachtung von Meeresverschmutzung und Erosion, die Vermessung

³Die Verwendung von Wettersatelliten zur Untersuchung von global change liegt nahe, da Wettersatelliten als Service-Satelliten Parameter über lange Zeiträume mit (nahezu) unveränderter Instrumentierung messen und damit die für eine Klimatologie notwendige lange Datenbasis erzeugen können.

Band No.	Band center (nm)	Bandwidth (nm)	Application
1	412.5	10	Yellow substance and turbidity
2	442.5	10	Chlorophyll absorption maximum
3	490	10	Chlorophyll and other pigments
4	510	10	Turbidity, suspended sediment and red tides
5	560	10	Chlorophyll, suspended sediment
6	620	10	Suspended sediment
7	665	10	Chlorophyll absorption
8	681.25	7.5	Chlorophyll fluorescence, red edge
9	705	10	Aerosol, red edge transition
10	753.75	7.5	Oxygen absorption reference band, vegetation
11	760	2.5	O ₂ absorption R-branch
12	775	15	Aerosol, vegetation
13	865	20	Aerosols correction over ocean
14	890	10	Water vapor absorption reference
15	900	10	Water vapor absorption, vegetation

Tabelle 4.4: Spektralbänder von MERIS und Anwendungsbeispiele

von atmosphärischem Wasserdampf und Aerosol, die Beobachtung der Wolkenbedeckung, die Kartierung von Schnee- und Eisflächen an Land, die Beobachtung der Bioproduktivität sowie Untersuchungen zur Pflanzengesundheit. Eine genauere Instrumentbeschreibung ist unter [344, 21] zu finden, die Beschreibung der Datenprodukte und Dokumentation unter [349, 350] (gibt es, wie bei den anderen Instrumenten auch, auch als pdf zum Herunterladen).

§ 665 MIPAS (Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding [318]) ist ein Limb-Emission-Sounder im Spektralbereich zwischen $4.15 \mu\text{m}$ und $14.6 \mu\text{m}$ zur Untersuchung der Chemie der Stratosphäre (insbesondere die Messung von O₃, NO, NO₂, HNO₃, HNO₄, N₂O₅, ClONO₂, COF₂, HOCl), zur Klimaforschung (insbesondere Messung der globalen Verteilung relevanter Parameter wie Wolken, Aerosole, O₃, CH₄, H₂O, N₂O, FCKWs (wie F11, F12, F22, CCl₄, CF₄ sowie CO, OCs), zur Untersuchung von Transportprozessen über die Tropopause (insbesondere Austausch von O₃, CH₄, N₂O, C₂H₂, C₂H₆ oder SF₆ zwischen Troposphäre und Stratosphäre) sowie die Chemie der oberen Troposphäre (insbesondere Messung von NO, CO, CH₄, O₃ und HNO₃). MIPAS misst in einem Höhenbereich von 8 km bis 150 km mit einer Höhengauflösung von 3 km. MIPAS alleine hat eine Masse von 327 kg und eine Leistungsaufnahme von 210 W. Die Instrumentbeschreibung findet sich unter [51], das Handbuch zu den Datenprodukten unter [351].

§ 666 RA-2 (Radar-Altimeter-2) mit einem zusätzlichen Laser Retro-Reflector (LRR, im Prinzip nichts anderes als LAGEOS) ist ein typisches Altimeter mit der Fragestellung nach der genauen Form des Geoids und der bereits im Zusammenhang mit dem SeaSat Altimeter diskutierten Messung von Wellenhöhen. Der LRR dient der zusätzlichen Überprüfung und Kalibrierung des RA-2, so dass gegenüber früheren Instrumenten eine größere Genauigkeit erwartet wird. Für die Instrumentbeschreibung siehe [195], das Datenhandbuch findet sich unter [360].

§ 667 MWR (Microwave Radiometer [345]) ist eher ein Service-Instrument: seine wichtigste Aufgabe ist die Messung des Wasserdampfgehalts der Atmosphäre. Damit lässt sich das Signal von RA-2 korrigieren.

§ 668 ASAR (Advanced SAR) ist ein fortgeschrittenes bildgebendes Radarsystem,⁴ das das von der Erdoberfläche zurück gestreute Radarsignal in fünf verschiedenen Polarisations-Moden misst. Das Bodenaufklärungsvermögen hängt von der gewählten Breite des Abtaststreifens ab; es liegt bei $28 \times 28 \text{ m}^2$ bei einer Streifenbreite von 100 km bis zu $950 \times 980 \text{ m}^2$ bei einer Streifenbreite von mehr als 400 km. Diese Flexibilität erlaubt die Anpassung an die räumlichen Skalen einer gerade aktuellen Fragestellung oder Beobachtungskampagne. Die

⁴Naja, es ist ein fortgeschrittenes Radarsystem; TerraSAR (siehe Abschn. 4.6) ist natürlich deutlich besser, benötigt dafür aber auch einen eigenen Satelliten mit entsprechendem Solarpanel während ASAR auf einem normalen Satelliten als Beipack fliegen kann.

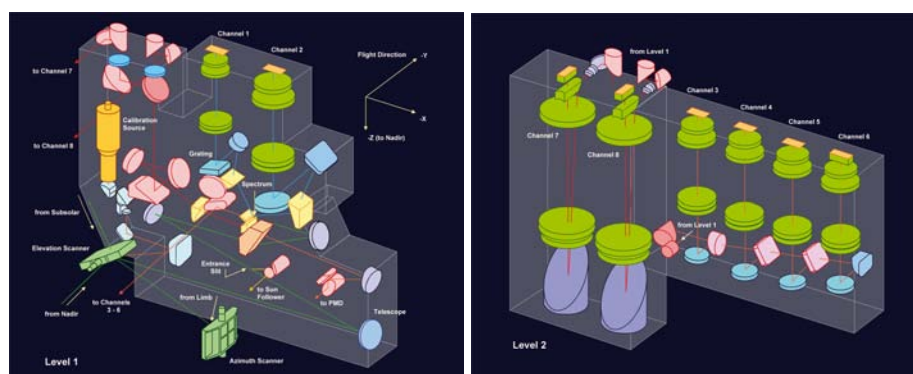


Abbildung 4.3: Optisches System von Sciamachy [75]

wichtigsten mit ASAR zu untersuchenden Fragestellungen auf globalen Skalen betreffen den Zustand des Meereises auf verschiedenen Skalen, die Kartographie der Eisschichten und ihrer Dynamic, die Kartographie des Meereises und seiner Dynamik, die Beobachtung natürlicher und anthropogener Verschmutzungen über den Ozeanen sowie der Nachweis großskaliger Veränderungen in der Vegetation (z.B. Desertifikation). Die Modi mit hoher Bodenauflösung erlauben auch die Untersuchung regionaler Fragestellungen, z.B. Küstenschutz, Monitoring des Schiffsverkehrs sowie alle klassischen Fragen wie land- und forstwirtschaftliches Monitoring, Monitoring der Bodenfeuchte und geologische Exploration. Eine Instrumentbeschreibung findet sich unter [46, 53], das Datenhandbuch unter [342].

§ 669 GOMOS (Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars [312]) ist ein Limb-Sounding Spektrometer, das das Spektrum vom UV bis zum nahen Infrarot abdeckt. Das Instrument arbeitet im Absorptionsmodus, als Lichtquellen werden nicht wie sonst üblich Sonne oder Mond sondern Sterne verwendet. Dadurch wird eine permanente Datenerfüllung erreicht – insbesondere sind Messungen in der Polarnacht möglich. Die wichtigsten zu messenden Parameter sind die Höhenprofile von Aerosolen, Temperatur, O_3 , H_2O , NO_2 und NO_3 in der Stratosphäre mit einer vertikalen Auflösung von 1.7 km. Die wichtigste Aufgabe von GOMOS ist die langfristige Beobachtung von stratosphärischem und mesosphärischem Ozon und Wasserdampf sowie der Änderungen dieser Parameter. Eine Instrumentbeschreibung steht unter [193], das Datenhandbuch unter [348].

§ 670 AATSR (Advanced Along Track Scanning Radiometer, [304]) ist ein bildgebendes Radiometer, das in 4 Kanälen im IR ($1.6 \mu m$ für Wolkenbedeckung und -schichtung, sowie 3.7 , 10.8 und $12.0 \mu m$ jeweils für die Temperatur der Meeresoberfläche) sowie drei Kanälen im sichtbaren bzw. nahen IR ($0.55 \mu m$ für den Nachweis von Chlorophyll, 0.66 und $0.87 \mu m$ für den Vegetationsindex) arbeitet. Das räumliche Auflösungsvermögen beträgt $1 km^2$ bei einer Streifenbreite von 500 km, das Temperaturlösungsvermögen für die Temperatur der Meeresoberfläche soll besser als 0.3 K sein. Eine Instrumentbeschreibung findet sich unter [20], das Datenhandbuch unter [341].

§ 671 SCIAMACHY (Scanning Imaging Absorption Spectrometer for atmospheric Cartography [325, 670]) ist ein passives, auf der Basis von GOME [310, 311] entwickeltes Spektrometer zur Messung von Spurengasen in der Troposphäre und Stratosphäre. Es überdeckt den Spektralbereich von 240 bis 2400 nm und verwendet parallel zwei Sounding Techniken: Limb-Sounding unter Verwendung von Sonne bzw. Mond als Lichtquellen und Messung des zurück gestreuten Lichts. Der Spektralbereich ist in acht, den verschiedenen zu untersuchenden Spurengasen angepasste Bänder unterteilt. Im Absorptionsmodus wird eine differentielle Technik verwendet wie sie auch für die Ozonmessung vom Erdboden aus benutzt wird: man vergleicht die Intensitäten in zwei Spektralbändern, von denen das eine durch Absorption an

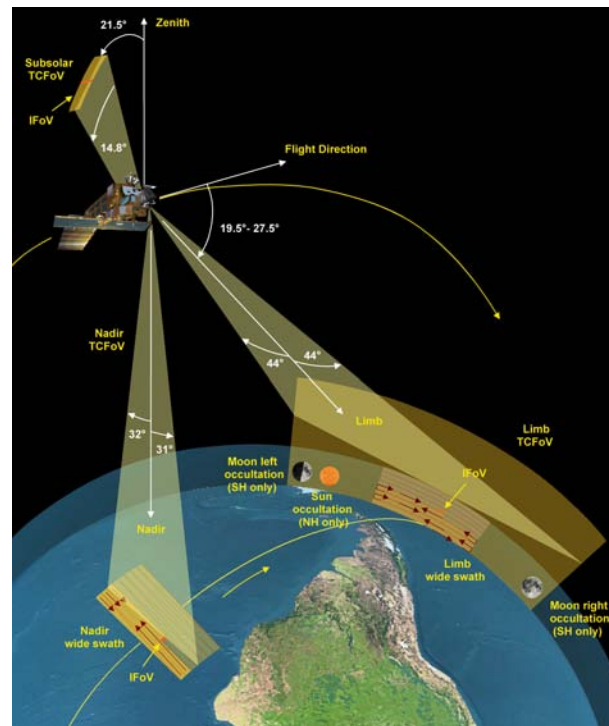


Abbildung 4.4: Blickrichtungen von Sciamachy [75]

dem zu untersuchenden Spurengas nicht beeinflusst ist, das andere dagegen wohl. Die wissenschaftlichen Ziele von SCIAMACHY umfassen die globale Konzentration und Verteilung von Spurengasen in der Tropo- und Stratosphäre, die Messung von Aerosolen, Wolkenhöhen und des spektralen Reflektionsvermögens von Oberflächen, die Messung der troposphärischen Spurengase O_3 , O_2 , O_4 , NO_2 , N_2O , CO , CO_2 , CH_4 und H_2O sowie unter bestimmten Bedingungen $HCHO$, SO_2 und NO_3 , sowie die Messung der stratosphärischen Spurengase O_3 , O_2 , NO , NO_2 , NO_3 , N_2O , CO , CO_2 , CH_4 und H_2O sowie im Ozonloch $OCIO$ und ClO . Die Datenprodukte werden beschrieben unter [346], die SCIAMACHY-Homepage der Uni Bremen ist unter [696] zu finden. Messprinzipien und Instrumente sowie erste Ergebnisse sind auch in [75] dargestellt.

§ 672 Die große Bandbreite von Aufgaben bringt auch ein komplexeres Instrument mit sich als von den einfachen Imagern oder Soundern gewohnt. Abbildung 4.3 gibt einen Einblick in die Optik von Sciamachy.

§ 673 Als ein Beispiel für die während eines Tages gemessenen Daten von Sciamachy haben wir in Abb. 3.81 die während eines Tages gemessene Ozonsäule gesehen. Diese wird nicht kontinuierlich entlang der Bodenspur bestimmt, da Sciamachy sowohl in Nadir-Richtung als auch als Limb-Sounder betrieben wird, siehe Abb. 4.4 und zwischen diesen Modi gewechselt wird.

4.5 Small is beautiful: CHAMP und Diamant

§ 674 CHAMP (Challenging Minisatellite Payload, [376]) ist ein Satellit, mit dessen Produkten wir, im Gegensatz zu denen der bisher beschriebenen Missionen, als Normalverbraucher wahrscheinlich kaum in Berührung kommen werden. CHAMP ist ein Satellit des Geoforschungszentrums Potsdam und ist mit der genauen Vermessung des Schwerfeldes der Erde und des geomagnetischen Feldes befasst. Mit Hilfe seines GPS Empfängers führt er ferner Okkultationsexperimente durch, d.h. er untersucht auch die Atmosphäre, insbesondere die

Band No	Band center (nm)	Commercial applications	Science applications
1	415	Water quality mapping road detection, land cover, urban areas	Desert soils, biogenetic crusts, dissolved organic material
2	445	Real natural blue color for mass media, water quality, urban areas, landcover,	Low chlorophyll concentration, maximum chlorophyll-A absorption at 450 nm
3	490	Water monitoring, road detection, lithology and soils, crops and farming	Non-linear chlorophyll, medium chlorophyll concentration
4	510	Soils, landcover, surveying, water quality, coastal zones	Low suspended sediment, high pigment concentration
5	555	Real natural green color for mass media, landcover, crops and farming	Green peak of chlorophyll, null band of chlorophyll variation
6	645	Real natural red color for mass media, landcover, lithology and soils, forestry	Chlorophyll absorption, vegetation indices, high suspended sediment
7	670	Crops and farming, pest control, security	Max chlorophyll absorption, vegetation indices, 2nd peak of chlorophyll-A absorption
8	700	Vegetation general, nature conservation	Red edge of vegetation
9	740	Vegetation general, nature conservation	Red edge of vegetation
10	790	Vegetation general, nature conservation	Red edge of vegetation
11	865	Lithology and soils, crops and farming, forestry, landcover, nature conservation	Max. chlorophyll reflectance, vegetation indices, water vapor, atmospheric correction
12	905	Lithology and soils, nature conservation, wetlands, coastal waters	Max. chlorophyll reflectance, atmospheric correction

Tabelle 4.5: Spektralkanäle MSRS und Anwendungsbeispiele

Elektronendichte der Thermosphäre. Das Teilcheninstrument auf CHAMP ist leider während des Starts beschädigt worden und hat keine sinnvollen Daten geliefert.

§ 675 CHAMP ist interessant insofern, als dass er am anderen Ende des Spektrums von Satellitengrößen liegt: während alleine der Scanner des ETM+ auf LandSat 7 eine Masse von 318 kg und eine Leistungsaufnahme von 590 W hat, hat der gesamte Satellit CHAMP lediglich eine Masse von 522 kg und eine Leistungsaufnahme der Nutzlast von nur 50 W.

§ 676 Auch ein Spektrometer lässt sich mit einem kleinen und billigen Satelliten realisieren, z.B. das MSRS (Multi-Spectral High Resolution System, [371]) auf Diamant. Das Instrument soll Anwender-orientierte Daten liefern. Dazu werden 12 Spektralkanäle im sichtbaren und nahen IR ausgewertet mit einer Bodenauflösung von 5 m, einem Blickfeld von $26 \times 40 \text{ km}^2$ und hoher radiometrischer Auflösung. Die einzelnen Spektralkanäle und Anwendungsbeispiele sind in Tabelle 4.5 gegeben. Statt eines Scanners wird ein Array aus CCDs verwendet, das Scannen erfolgt dann wie bei der Kehrbesentechnik.

§ 677 Das ganze Raumfahrzeug ist mit einer Masse von weniger als 250 kg deutlich leichter als nur der Scanner des ETM+ und hat auch nur eine mittlere Leistungsaufnahme von 55 W. Die großen Unterschiede zwischen diesen beiden Instrumenten haben zwei Ursachen: das größere Blickfeld von LandSat 7 auf Grund des Scanners statt der CCD ist ein wesentlicher instrumenteller Unterschied. Damit zusammen hängt der zweite Grund: MSRS basiert auf neuer Technologie (vulgo: die fliegen einfach kleine Digitalkameras mit etwas befremdlichem Seitenverhältnis) während LandSat eine Weiterentwicklung einer eher fossilen Technik trägt. Die unterschiedlichen Ansätze haben ihre Gründe: Diamant ist ein kommerzielles, anwendungsorientiertes System für ganz spezielle aktuelle Fragen eines Anwenders (z.B. Ernteüberwachung), während LandSat als Monitoring-System die Kontinuität erhalten muss: heutige Datensätze können nur Veränderungen gegenüber älteren Datensätzen zeigen, wenn sie mit vergleichbaren Instrumenten aufgenommen wurden oder wenn zumindest die Instrumente zur wechselseitigen Kalibrierung eine gewisse Zeit gemeinsam im Orbit waren.

§ 678 Von den Leistungsdaten her ist die Kombination Diamant/MSRS ein Hybrid zwischen den kleinen kommerziellen Bildspähern und den großen Forschungssatelliten: Masse und Leistungsaufnahme sind in der Größenklasse der kleinen Kommerziellen während Performance (und damit auch die zu untersuchenden wissenschaftlichen Fragestellungen) deutlich an die großen Instrumente angelehnt sind – und diese abgesehen vom ETM+ noch eher übertreffen.



Abbildung 4.5: Sydney von TerraSAR-X – die Wellenmuster sind uns bereits aus Abb. 3.68 bekannt [298]

4.6 Der Radarspäher: TerraSAR

§ 679 Bei den aktiven Mikrowelleninstrumenten in Kap. 3 hat stets SeaSat mit seinen Instrumenten Pate gestanden. Sein moderner Nachfolger ist TerraSAR-X [296, 297, 380, 757] – mit einem feinen Unterschied: Landsats moderne Brüder heißen SPOT oder Ikonos und sind kommerziell.⁵ Gleiches gilt für TerraSAR; hierbei handelt es sich um eine Public-Private Partnership PPP zwischen EADS Astrium⁶ [330] und dem DLR. TerraSAR-X wurde am 15. Juni 2007 gestartet; eine TerraSAR-L Mission [262, 299, 698] befindet sich in der Planungsphase und soll als Cartwheel-Konfiguration (siehe § 509) gestartet werden.

§ 680 Beim aktiven Radarspäher sind Ausmaße und Leistungsaufnahme die technischen Herausforderungen. TerraSAR-X1 hat eine Antenne mit einer Fläche von $650 \times 85 \text{ cm}^2$ und einer Masse von 370 kg (zuzüglich 120 kg für die Elektronik). Die Leistungsaufnahme beträgt 3.65 kW, das Array an Solarzellen liefert eine mittlere Leistung von 875 W; 40 Ah können in 26 NiH-Zellen gespeichert werden. Im scannenden Modus ergibt sich ein Datenstrom von 816 Mbit/s bei einem maximalen Downlink von 300 Mbit/s – wie gut, dass die Solarzellen nicht genug Leistung erbringen, um ganztägige Aufnahmen zu erlauben.

§ 681 Wie der Name suggeriert, arbeitet TerraSAR-X im X-Band, d.h. bei einer Wellenlänge von 31 mm bzw. einer Frequenz von 9.6 GHz. Zusammen mit der großen SAR-Antenne lässt sich ein Bodenaufklärungsvermögen von 1 m im Spot-Modus erreichen. Abbildung 4.5 zeigt als Beispiel eine im Überblick-Modus mit einem Bodenaufklärungsvermögen von 3 m gemachte Aufnahme von Sydney – und insbesondere natürlich wieder die Wellenmuster auf der Wasseroberfläche.

§ 682 Die Tatsache, dass Deutschland sich einen zivilen Radarspäher leistet, ist nicht wirklich überraschend: Deutschland leistet sich mit SAR-Lupe [270, 333, 651] auch ein militärisches Radarsystem. SAR-Lupe besteht aus 5 Satelliten in jeweils ca. 500 km Flughöhe und polaren, allerdings nicht sonnensynchronen Orbits. Von diesen fünf Satelliten sind bisher 3 gestartet [692], der vierte soll Ende März 2008 gestartet werden. Die geplante Konfiguration aller fünf Satelliten ist in [23] gezeigt.

⁵TerraSAR ist allerdings nicht der erste kommerzielle Radarsatellit. Diese Ehre gebührt RadarSat [282, 373], Ende 2007 ersetzt durch RadarSat-2 [283, 397].

⁶Die – oder genauer der Mutterkonzern EADS – bauen im Zweifelsfall alles: sei es eine Flotte von Tankflugzeugen für die US-Air Force mit einem Auftragswert von 35 Milliarden US\$, sei es den Airbus 380. EADS ist ein typisches Beispiel für die in der Einleitung erwähnte Unübersichtlichkeit: die Firma mischt einerseits im militärischen wie zivilen Luft- und Raumfahrtgeschäft mit und andererseits baut sie als eine permanent vom Staat unterstützte (und auch finanziell nicht wirklich vom Staat unabhängige) Firma eine PPP auf. Ist das ein Selbstgespräch des Staats mit dem Staat?

§ 683 SAR-Lupe wird zusammen mit dem GMES [364] von EuMetSat und den Aufnahmen der französischen Helios [461] Spionagesatelliten kombiniert werden. Damit entsteht ein mächtiges europäisches Aufklärungssystem im All – alles natürlich nur, wie auch schon das Disaster Management im Interesse einer sichereren Welt [331]. Deutschland beteiligt sich damit erstmals aktiv und offiziell an der Militarisierung des Weltraums – indirekte Beteiligungen gibt es sicherlich schon viel länger. Auch wenn es nicht gerade die seriöseste Quelle ist, [86] gibt einen kurzen Einblick in diese Thematik.

4.7 Lost and found: GPS-NavStar

§ 684 Das Global Positioning System (GPS [728]) ist nicht nur für die Positionsbestimmung auf der Erde wichtig sondern auch für die Positionsbestimmung von Satelliten: was nützt die Angabe der Höhe von SeaSat über dem Ozean zur Bestimmung des Geoids mit einer Genauigkeit von 1 cm wenn die Position von SeaSat nur mit einer Genauigkeit von 150 m bekannt ist? Außerdem ist GPS vielleicht auch das am häufigsten zweckentfremdete System: da Radiosignale durch den Wasserdampfgehalt der Atmosphäre beeinflusst werden und gleichzeitig die GPS-Signale genau bekannt sind (insbesondere ihr Timing) lässt sich ein GPS-Empfänger auch zur Messung atmosphärischer Bedingungen missbrauchen. Dazu zählen die Feuchte⁷ und ihre Konsequenzen für die Wettervorhersage (z.B. [45, 243]) ebenso wie die Ionisation der Atmosphäre (z.B. [14, 172]). Außerdem lässt sich ein ortsfester GPS Empfänger zur Messung von Bodenbewegungen verwenden – auf diese Weise wurden die Veränderungen der Yellowstone Caldera [715] vermessen.

§ 685 GPS wird durch ein Netz von 21 NavStar (NAVigations System with Time And Ranging, [741]) Satelliten realisiert mit Flughöhen von 20 200 km und einer Inklination von 55°; die ursprünglich geplante Inklination von 63° hätte eine Überdeckung auch der hohen Breiten ermöglicht und das System damit wirklich global gemacht, die 55° wurden gewählt, damit die NavStars auch vom Space Shuttle gestartet werden können. Die Einschränkung ist rückwirkend bedauerlich, da ohnehin nicht vom Space Shuttle aus gestartet wurde und die niedrige Inklination für Nutzer in höheren Breiten dazu führt, dass nicht in allen Richtungen Satelliten detektiert werden können. Dadurch verringert sich einerseits die Genauigkeit des Systems, andererseits können Hindernisse zwischen Satellit und Nutzer die Ortsbestimmung unmöglich machen.⁸

§ 686 Das NavStar-Programm wurde 1973 vom DoD initiiert, der erste Satellit startete 1978, erst 1992 war das System vollständig. Seitdem werden immer wieder neue NavStar-Satelliten gestartet (Anfang 2004 der 54., Ende 2007 der 61. [741] – eine Liste der jeweils aktiven NavStars findet sich unter [267, 692]), da alte Satelliten ausfallen bzw. durch neuere Modelle ersetzt werden.

§ 687 Den ursprünglichen GPS-Signale für den zivilen Gebrauch war eine Störung überlagert, die die Genauigkeit in der Ortsbestimmung auf ca. 100 m reduzierte. Dieses Störsignal wurde Mitte der 90er Jahre entfernt, so dass heutzutage auch für zivile Anwender eine Genauigkeit im Bereich von einigen Metern (optimale Empfangsbedingungen) bis zu wenigen 10 m (ungünstiger Empfang) erreicht werden kann.⁹ Das gilt allerdings nur für die horizontale Position, bei der vertikalen Position haben normale Empfänger Ungenauigkeiten im Bereich von

⁷Die Messung der Luftfeuchte ist selbst in einer bemannten Wetterstation nicht trivial; mit Hilfe von GPS lässt sich aber auch in unzugänglichen Gegenden (Himalaya) ein Netz von Messstationen aufbauen. Während vom Boden aus ein Integral der Luftfeuchte gemessen wird, gilt diese Einschränkung im Himalaya kaum noch, da die über dem Beobachtungsort liegende Luftsäule nicht mehr groß ist.

⁸Ein Nutzer am südlichen Ufer eines in Ost-West-Richtung ausgerichteten Fjords hat keine Chance, irgendwelche Satelliten mit seinem Empfänger zu sehen, da diese alle durch die Felswand abgeschattet sind. Würden Satelliten bis in höhere Breiten fliegen, so könnte er zumindest einige sehen.

⁹Wofern die USA nicht gerade damit beschäftigt sind, einen Schurkenstaat in seinem Benehmen einzunorden und allen anderen, Schurken oder nicht, die Möglichkeit nehmen wollen, sich mit Hilfe von GPS genau zu orientieren oder gar einzumischen.

etlichen 10 bis ca. 100 m – die Koordinate wird mit der geringsten Genauigkeit bestimmt, da man davon ausgeht, dass sich der Anwender letztendlich nicht im 3D bewegt sondern auf einer gekrümmten Fläche, d.h. sein Aufenthaltsort durch zwei Koordinaten bestimmt ist.

§ 688 Die Genauigkeit eines GPS-Empfängers lässt sich auf Ortsgenauigkeiten im cm-Bereich verbessern, wenn man zusätzlich zu den Satelliten eine ortsfeste Referenzstation verwendet. Dieses Verfahren wird als differentielles GPS (DGPS) bezeichnet, es wird u.a. bei den Vermessungsämtern verwendet sowie bei GPS-basierten Navigationssystemen von Rettungsdiensten.

§ 689 Das russische Konkurrenzunternehmen ist GLONASS [658] mit z.Z. 19 Satelliten [692]; das europäische Konkurrenzprodukt Galileo [290, 359] dümpelt in seinen Finanzierungsproblemen mit einem bisher gestarteten Testsatelliten vor sich hin – macht aber bereits fleißig Werbung für seine Servicegarantien und die damit verbundene Möglichkeit eines Einsatz auch in sicherheitskritischen Anwendungen [275].

4.8 Mission to Planet Earth

§ 690 Bei dem Projekt Mission to Planet Earth (Earth Observing System EOS [611, 411]) handelt es sich um einen Versuch der NASA und ursprünglich auch der ESA (jetzt handelt es sich um ein gemischtes internationales Konsortium unter Führung der NASA) möglichst viele Satelliten-Beobachtungen der Erde zusammenzufassen. Dabei sollen die Instrumente aufeinander abgestimmt sein, so dass sie einander möglichst perfekt ergänzen und auch in ihren zeitlichen und räumlichen Datenrahmen aufeinander abgestimmt sind, so dass eine Synchronisation verschiedener Instrumente überhaupt erst möglich wird. Ziel dieser Mission ist die Entwicklung eines möglichst vollständigen Bildes der dynamischen Prozesse auf der Erde; frei nach dem Motte “Was Sie schon immer über die Erde wissen wollten, aber bisher nicht zu fragen wagten (nach Woody Allen, 1972). Dabei hat auch die Frage nach dem Einfluss des Menschen auf seine Umwelt eine zentrale Bedeutung. Die Instrumente, die bei diesem Projekt berücksichtigt werden, umfassen das komplette Spektrum von Instrumenten, die für remote sensing entwickelt wurden inkl. einer langen Wunschliste (vgl. Abschn. 3.6) neu zu entwickelnder bzw. teilweise auch entwickelter Instrumente.

§ 691 In einem gewissen Sinne ist Mission to Planet Earth auch Konkurrenzprojekt zu dem Einzelsatelliten EnviSat der ESA – ursprünglich war letzteres als Teilprojekt von EOS geplant. Während EnviSat erfolgreich gestartet wurde und Daten liefert, leiden viele Satelliten des Mission to Planet Earth Programms unter Unterfinanzierung bzw. es wurde ein Satellit gestartet, aber der Satellit, der die ergänzenden Instrumente trägt, nicht oder nicht rechtzeitig; teilweise auf Grund politischer Probleme (wie viel Umwelt braucht der Mensch?, sind ‘flags and footprints’ auf dem Mars nicht vielleicht wichtiger?), teilweise auf Grund der fehlenden Fokussierung der einzelnen Projekte und Satelliten, da viele Instrumente nur deshalb vorgeschlagen wurden, weil auch diese bestimmte Gruppe ein Instrument bauen wollte. Ohne den Einstieg anderer Nationen wäre es gar nichts geworden – allerdings hat die Koordination vieler Einzelinteressen nicht nur mehr Geld gebracht sondern auch viele Ressourcen gebunden. Die folgende Übersicht der Zielsetzungen hat daher eher historische Bedeutung, die Grundidee des Projekts ist populär in Baker [10] zusammen gefasst, die Grundidee und der aktuelle Stand findet sich unter [411, 409]; einige der Kernprojekte sind auch in Abschn. 4.8.3 vorgestellt. Einige der geplanten Instrumente haben wir auch in Abschn. 3.6 kennen gelernt.

4.8.1 Zielsetzung

§ 692 Grob gesagt soll Mission to Planet Earth alle Fragestellungen bezüglich der Erde, ihrer Untersysteme wie Biosphäre, Hydrosphäre oder Geosphäre, und die Wechselwirkungen zwischen diesen Teilsystemen umfassen. Dazu sind die Zielsetzungen in zwei Zeitskalen unterteilt: geologische Zeitskalen im Bereich von Tausenden und Millionen von Jahren. Das sind

im wesentlichen die Prozesse, die die Erde geformt haben bzw. externe Einflüsse, die sich auf derartig langen Zeitskalen abspielen, z.B. klimatische Veränderungen durch Schwankungen der Erdbahnparameter (Milankovich-Theorie) oder Veränderungen des solaren Energieoutputs. Die andere Zeitskala umfasst Perioden von Jahrzehnten oder Jahrhunderten. Dazu gehören auch die anthropogenen Einflüsse auf das Klima und die Biosphäre (Spurengase, CO₂, Ozonloch, Abholzung des tropischen Regenwaldes, Flächenversiegelung).

§ 693 Die wesentliche Zielsetzung ist also, die Erde als etwas veränderliches zu erkennen, die Zeitskalen dieser Veränderungen zu beschreiben und zu den durch den Menschen bewirkten Veränderungen in Beziehung zu setzen.

§ 694 Die wesentlichen Anstöße zu den langfristigen Forschungen kommen aus der Geophysik und Geologie, als wesentliche Stichworte seien hier erwähnt Prozesse im Kern und Mantel der Erde, die ihrerseits wieder Auswirkungen auf das Erdmagnetfeld (dessen Veränderungen wir an den Ablagerungen in der Nähe der Tiefssegräben verfolgen können) und durch Ausgasungsprozesse auch auf die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre haben.¹⁰ Auch die Ausbildung der Topographie ist über die Kontinentaldrift und Vulkanismus mit den Vorgängen im Erdinnern verbunden. Die Bedeutung der Kontinentaldrift für das Klima auf der Erde und auch die Entwicklung von Leben ist nicht zu vernachlässigen; so können z.B. Eiszeiten nur dann entstehen, wenn mindestens eine Polregion landbedeckt ist oder, wie im Falle des Norpols, so von Land umschlossen ist, dass die warmen Meeresströmungen nicht bis in diese Bereiche gelangen können [173, 216, 227]. Veränderungen der Lage der Kontinente bewirken natürlich auch Veränderungen in den globalen Zirkulationsmustern (sowohl Meeres- als auch atmosphärische Zirkulation). Zusätzlich sind auf diesen langen Zeitskalen auch Veränderungen externer Parameter wie z.B. der Einstrahlung der Sonne zu berücksichtigen

§ 695 Die meisten anderen an der Mission to Planet Earth beteiligten Wissenschaftsbereiche befassen sich eher mit den kurzzeitigen Veränderungen, über die Abb. 4.6 einen Überblick gibt. Dabei sind die Größen $n(x)$ und $\phi(x)$ jeweils Konzentrationen bzw. Flüsse einer Größe x . Beispiele sind die Glazialogie, die das Schnee- und Eisvorkommen auf der Erde kartographiert, dazu gehören auch Veränderungen in der Eisbedeckung der Antarktis sowie Gletscherschwankungen. Diese Untersuchungen geben Aufschlüsse über lokale und globale Veränderungen von Lufttemperatur und Zirkulationssystemen. Ein weiterer Forschungspunkt ist in diesem Zusammenhang die Dynamik schneller Gletschervorstöße. Alle diese Fragen sind auch mit der Frage nach klimatischen Änderungen und den möglichen anthropogenen Einflüssen verbunden, so können Gletscher z.B. als eine Art globales Thermometer betrachtet werden, haben jedoch ihrerseits durch Veränderungen der lokalen Strahlungsbilanz auch wieder Rückwirkungen auf die Prozesse, die sie zum Wachsen oder Schrumpfen brachten (positive und negative Feedback-Mechanismen [124]).

§ 696 Nicht nur mit den Gletschern sondern ebenso mit der Biosphäre verbunden ist der Wasserkreislauf als Forschungsgebiet der Hydrologie. Hierzu gehören die regionale und globale Bestimmung von Niederschlag und Verdunstung (Feuchtebilanz), insbesondere auch die Frage, welche Merkmale diese Niederschlagsmuster bestimmen. Interessant ist hier der tropische Regenwald, da er über dem Festland die größten Niederschlagsmengen erhält. Der Wasserkreislauf beeinflusst jedoch über die regionale Niederschlagsverteilung nicht nur die

¹⁰Heutige Vorstellungen über die Entwicklung des Planetensystems gehen davon aus, dass Atmosphäre und Hydrosphäre durch Vulkanismus aus der noch heißen, jungen Erdkugel entstanden sind; die sich dabei ausbildende Uratmosphäre war ursprünglich völlig lebensfeindlich – zumindest für heutiges Leben. Die Cyanobakterien als die ersten Lebensformen begannen dann jedoch, die Atmosphäre zu verändern, so dass sich in einem ca. 3.8 Milliarden Jahre dauernden Wechselspiel zwischen Leben und Atmosphäre die heutige Atmosphäre entwickelt hat. Die größte Umweltverschmutzung war demnach der Übergang des Lebens vom Meer auf das Land: die Uratmosphäre enthielt keinen Sauerstoff und damit auch kein Ozon, so dass biologische Materie an Land sofort durch die solare UV-Strahlung zerstört wurde. Erst als die Pflanzen im Wasser soviel Sauerstoff ausgeatmet hatten, dass sich eine dünne Ozonschicht bilden konnte, konnten sie auch die Landflächen besiedeln und durch erhöhte Bioproduktivität den Sauerstoff in die Atmosphäre eintragen und damit die Ozonschicht ermöglichen, die zur Entwicklung höherer Lebewesen erforderlich war.

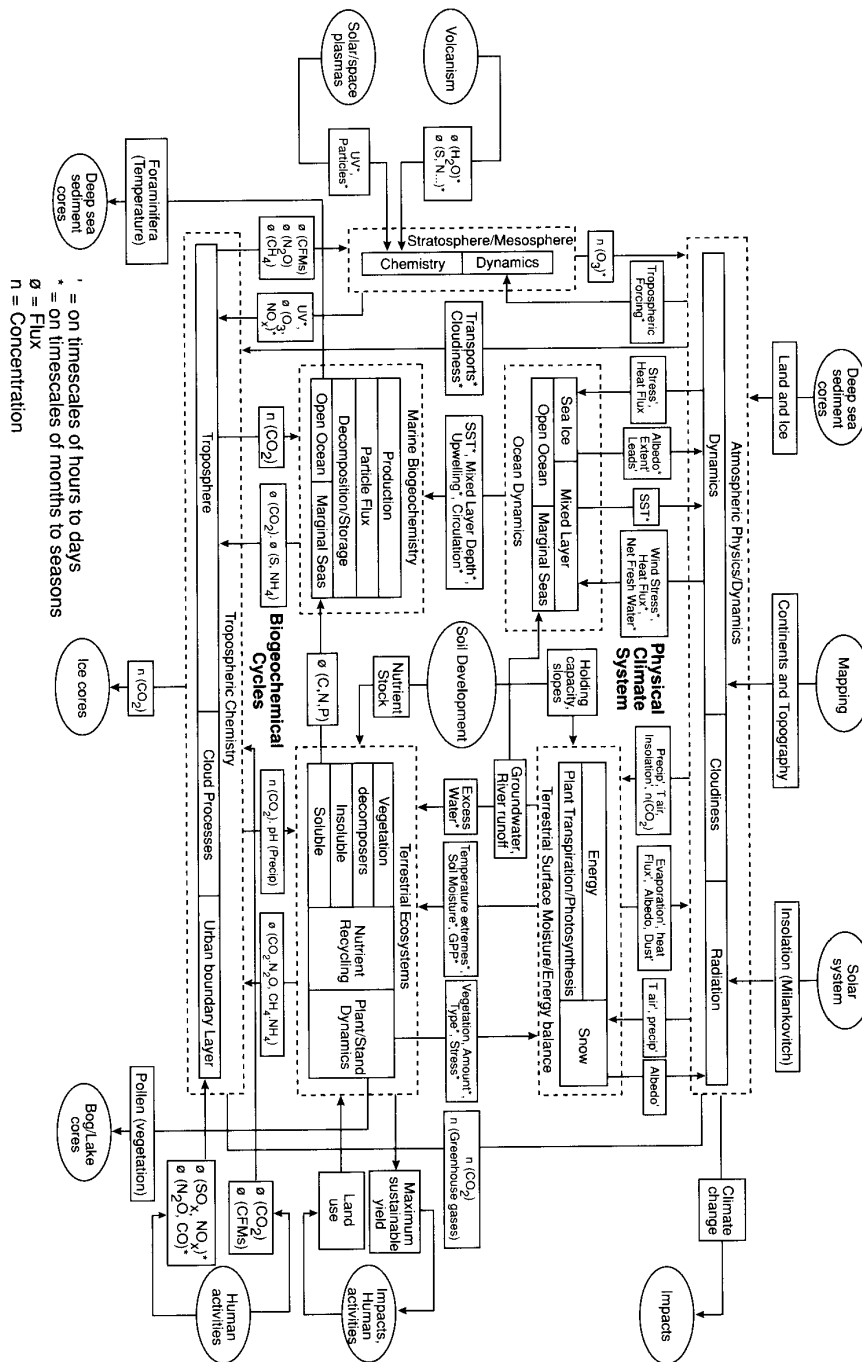


Abbildung 4.6: Modell des Systems Erde und der auf Zeitskalen von Jahrzehnten und Jahrhunderten wichtigen Prozesse [202]

Biosphäre (Versteppung bei Wassermangel, erhöhte Produktion an Biomasse bei ausreichend Wasser, aber auch Schäden bei Wasserüberschuss) sondern auch über die Erosion den geochemischen Kreislauf und über die Bildung von Schnee-, Eis-, und Wasserflächen die Strahlungsbilanz und damit auch die Temperatur der Erde; letzteres gilt ebenso für die Bewölkung und die Bedeutung der unterschiedlichen Wolken für die Strahlungsbilanz der Erde [92, 191]. Verdunstung und Niederschlag sind gleichzeitig für einen Teil des Wärmetransports verantwortlich.

§ 697 In direktem Zusammenhang damit steht die Atmosphärenforschung. Wesentliche Ziele sind das Verständnis der großräumigen Zirkulationsmuster, sowie der Bewölkung und der Luftfeuchtigkeit. Zusätzliche Bedeutung gewinnen in der Atmosphärenforschung immer mehr die Abschätzungen der Auswirkungen anthropogener Einflüsse. Dazu zählen insbesondere Messungen der Konzentration und Höhenverteilung von Ozon, Aerosolen und CO_2 sowie anderer klimarelevanter Spurengase. Gerade die Atmosphäre kann nicht als isoliertes System betrachtet werden, sondern steht in vielfältiger Wechselwirkung mit allen anderen Systemen, z.B. durch Eintrag von Aerosolen bei Vulkanausbrüchen (Wechselwirkung mit der Lithosphäre), klimatische Auswirkungen des Eintrages von Wasser in Form von Wolken oder Wasserdampf (WeWi mit der Hydrosphäre), Veränderung von Verdunstung und Zirkulation in Gegenwart großer Eisflächen (Kryosphäre), und nicht zuletzt die Wechselwirkung mit der Biosphäre (Senken für CO_2 , Quellen für O_2 , Veränderung der bodennahen Winde durch Veränderung des Bodenbewuchses).

§ 698 Damit kommen wir zum letzten entscheidenden Bestandteil des Systems Erde, der Biosphäre. Die direktesten Anwendungen von Satellitenbeobachtungen auf die Biosphäre liegen in der Forst- und Landwirtschaft, hier insbesondere in Überblicken über Flächennutzung und den Zustand der Vegetation (Reifezustand ebenso wie Schädigungen, s.o.). Die wichtigste Anwendung von Satellitenbeobachtungen der Biosphäre dürfte in den globalen Fragen liegen, z.B. nach der Biomasse insgesamt, insbesondere auch dem Plankton im Meer, das für die Speicherung von CO_2 eine nicht unerhebliche Rolle spielt. Aber auch einzelne Organismenfamilien können vom Satelliten aus kartographiert werden, so dass diese eventuell als Bioindikatoren für Auswirkungen von Klimaänderungen dienen können oder durch auffälliges Verhalten auf bisher nicht beachtete Zusammenhänge im System Erde hinweisen können. Als Beispiel für diese Indikatorfunktion sei der Rückgang des Phytoplanktons in der Nähe der Antarktis aufgrund des Ozonloches erwähnt. Dies ist einerseits der erste direkte Hinweis auf die Folgen des Ozonlochs für die Biosphäre, andererseits wird hieran auch eine Kopplung der vielen Systeme und ihrer Einflüsse auf das Klima deutlich: Das Ozonloch scheint das Phytoplankton zu reduzieren, damit wird aber eine CO_2 -Senke geschwächt, d.h. der Kohlendioxidgehalt in der Atmosphäre steigt relativ stark \rightarrow das Ozon trägt demnach (abgesehen von möglichen direkten Eingriffen in die Strahlungsbilanz der Erde) auch sehr indirekt zum Treibhauseffekt bei.

§ 699 Die Kenntnisse derartiger Zusammenhänge und die Messungen von Konzentrationen und Flüssen sind für die Güte unserer Klimamodelle von entscheidender Bedeutung, vgl. dazu den Artikel von Bolle [27], der ausführlich auf die Probleme und Defizite von Klimamodellen eingeht, ebenso wie die Artikel von Schneider [214] und White [252]. Diese Klimasimulationen rücken zunehmend in das Blickfeld, da zwar allmählich allgemein akzeptiert wird, dass ein CO_2 -Anstieg in der Atmosphäre zu globaler Erwärmung führen wird, jedoch können die Folgen einer derartigen Erwärmung möglicherweise völlig unerwartet ausfallen. So sind in letzter Zeit einige neuere Modellrechnungen aufgetaucht, die z.B. für Europa eine neue Eiszeit infolge des Treibhauseffektes prophezeien, da die anfangs geringe Erhöhung der Temperatur die globalen Zirkulationssysteme derart verändern würde, dass der Golfstrom nach Süden abgelenkt wird. Damit wird Europa aber eine entscheidende Wärmequelle entzogen, der Schnee der dann kälteren Winter würde länger liegen bleiben, damit aber auch die Albedo erhöhen und so zu einer weiteren Abkühlung führen (es wird mehr reflektiert, also weniger absorbiert). Der Effekt wäre, dass Europa innerhalb größenordnungsmäßig ei-

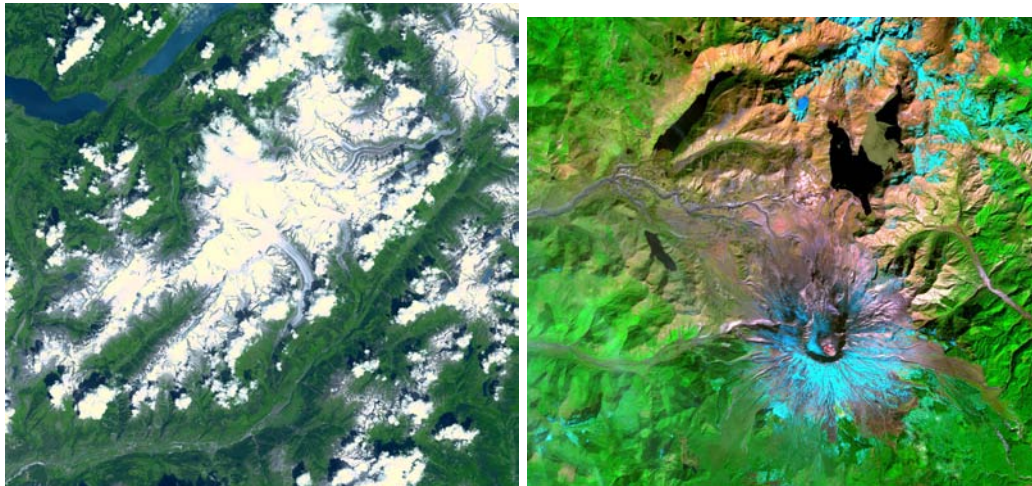


Abbildung 4.7: Großer Aletsch-Gletscher (*links*, [452]) und Mt. St. Helens (*rechts*, [661]) gesehen mit ASTER auf Terra

nes Jahrhunderts vergletschern könnte (z.B. [103, 126] und Zitate darin; die offiziellen und aktuellen Aussagen liefert dazu natürlich das IPCC [106]).

4.8.2 Earth Observing System EOS – Planung

§ 700 Das hierfür erforderliche System von Beobachtungssatelliten und Instrumenten gliederte sich in den ursprünglichen Planungen zwei Teile, die geplanten EOS-Satelliten (Earth Observing System [10]), die alleine jeweils 28 Instrumente tragen sollten, sowie viele Einzelmissionen unter verschiedenen Gesichtspunkten. Dazu gehören auch Beobachtungen vom Space Shuttle aus.

§ 701 Die beiden EOS Satelliten, ursprünglich EOS-A und EOS-B, heißen heute Terra und Aqua. Beide befinden sich in polaren Umlaufbahnen. Die Plattformen sollten in der ursprünglichen Planung eine Länge von 16 m und eine Breite von 4 m haben, das Gewicht sollte bei 14 t liegen. Die Instrumentation für EOS-A wurde zuerst festgelegt, die Instrumentation von EOS-B wurde anfangs nicht festgelegt: je nach den Erfahrungen mit EOS-A sollte der zweite Satellit entweder eine identische Instrumentierung bekommen oder aber nach völlig anderen Fragestellung ausgerüstet werden.

§ 702 Die Instrumente auf EOS-A sind ursprünglich geplant für die Untersuchung der folgende Fragestellungen:

- hydrologischer Zyklus (Verdunstung, Niederschlag, Transport von Wasserdampf, Wolken)
- Strahlungsbilanz und Oberflächentemperaturen,
- atmosphärische Zirkulation,
- biologische Aktivität und Ökosystem,
- Oberflächenmineralogie.

§ 703 Für den Fall, dass EOS-B keine zu EOS-A identische Instrumentierung erhält, wurden für ihn Instrumente mit folgenden Messaufgaben geplant:

- Stratosphäre: Ozon, Chemie, und Wind
- globale Beobachtung der troposphärischen Chemie,
- ozeanische und atmosphärische Zirkulation, insbesondere Oberflächenwinde,
- Glaziologie,
- Erdbeben.

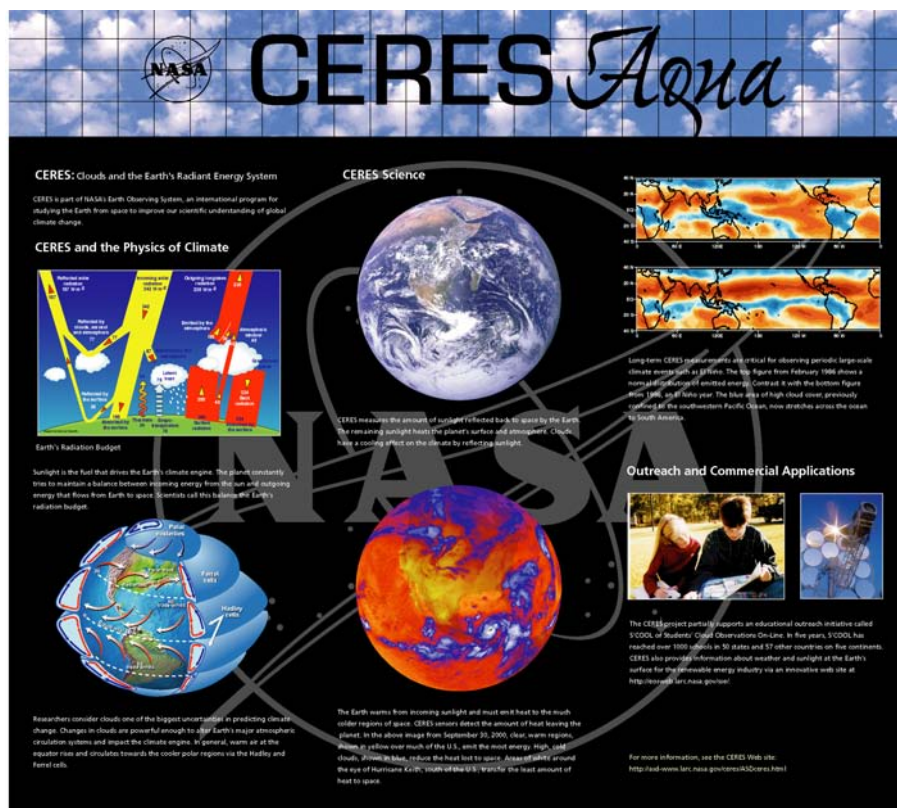


Abbildung 4.8: CERES Werbeposter [400]

§ 704 Das Gesamtsystem zur Erdbeobachtung wird noch um europäische und japanische Plattformen erweitert, die Informationen bereitstellen sollen über

- atmosphärische Zusammensetzung, Wasserdampf, Wolken und Aerosole
- Vorkommen von Mineralien und Pflanzenarten für Geologie, Land- und Forstwirtschaft,
- Temperatur der Meeresoberfläche und Windsysteme.

§ 705 Die auf diesen Satelliten zu verwendenden Instrumente gehören einer ganz anderen Generation an als die bisher diskutierten Instrumente (z.B. LandSat). Für einige der ursprünglich für EOS-A geplanten Instrumente wurde in Abschn. 3.6 eine kurze Übersicht über die Aufgaben und Fähigkeiten gegeben.

4.8.3 Earth Observing System EOS – Realität

§ 706 Die EOS-Plattformen wurden nie in der ursprünglich geplanten – und bei kritischem Hinsehen auch völlig überdimensionierten Form – realisiert. Als abgespeckte Varianten wurden die Satelliten Terra und Aqua als Rückgrat von EOS gestartet; der A-Train bildet das Rückgrat für die Atmosphärenforschung. Eine populäre Übersicht mit Links und Beispielen gibt [409].

Terra

§ 707 Terra [617] ist das Flaggschiff oder die Hauptmission von EOS. Terra, ursprünglich EOS-1 oder EOS-AM, wurde am 18. Dezember 1999 in eine ca. 700 km hohe sonnensynchrone Bahn mit einer Inklination von 98.8° gestartet. Seine ursprünglich geplante Lebensdauer von 6 Jahren hat Terra erreicht; der Satellit ist auch heute noch aktiv – er muss es auch

sein, da die zuarbeitenden Missionen teilweise noch nicht gestartet sind. Im Gegensatz zu den ursprünglichen, ambitionierten Planungen der NASA ist Terra kein rein amerikanischer Satellit. Auf der Terra Homepage [617] heißt es entsprechend:

Terra is a multi-national, multi-disciplinary mission involving partnerships with the aerospace agencies of Canada and Japan. Managed by NASA's Goddard Space Flight Center, the mission also receives key contributions from the Jet Propulsion Laboratory and Langley Research Center. Terra is an important part of NASA's Science Mission, helping us better understand and protect our home planet.

Wichtig ist natürlich der alles rechtfertigende letzte Satz.

§ 708 Terra ist mit fünf Instrumenten ausgestattet, deren Eigenschaften speziellen Fragestellungen angepasst sind:

- ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer [451], siehe auch § 558) nimmt hochauflösende Bilder in 14 Kanälen vom sichtbaren Licht bis in die thermische Infrarotstrahlung auf. Die Auflösung beträgt etwa 15 bis 90 Meter pro Bildpunkt. Daraus können Seehöhe, Oberflächentemperatur, Reflektivität und Emissivität des betrachteten Landteils abgeleitet werden. Das Instrument wurde in Japan gebaut; ASTER-Bilder können außer auf der Instrumentenhomepage z.B. auch bei [620, 662] eingesehen werden; Beispiele mit Erläuterungen sind auch in Abb. 3.99–3.101 und Abb. 4.7 gegeben.
- CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System [399]) bestimmt den gesamten Wärmefluss von beziehungsweise zur Erde und liefert Informationen über die Beschaffenheit der Wolken. An Bord von Terra befinden sich zwei CERES-Instrumente, eines davon beobachtet immer gerade in Richtung Erde, während das andere schwenkbar ist. CERES Instrumente befinden sich auch auf Aqua [413] und TRMM [431].
- MISR (Multi-angle Imaging Spectro-Radiometer [319, 465]) besteht aus 9 Kameras [466] mit jeweils 4 Spektralbändern (blau, grün, rot, nahes Infrarot); die Kameras beobachten die Erde unter verschiedenen Winkeln. Je nach Blickrichtung lassen sich damit unterschiedliche Fragestellungen untersuchen – außerdem lassen sich Stereo Aufnahmen erstellen. Das Instrument untersucht die Streuung des Sonnenlichts, Wolken, Aerosole und die Vegetation.
- MODIS (MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer, siehe auch § 557) [321, 502] hat eine relativ geringe Auflösung und arbeitet mit 36 Kanälen. Es dient zur Erkennung großräumiger Änderungen in der Biosphäre; Abb. 4.9 zeigt ein auf die Kryo- und Atmosphäre bezogenes Beispiel.
- MOPITT (Measurements of Pollution in the Troposphere [322, 691], siehe auch § 526) misst die Konzentration von Methan und Kohlenstoffmonoxid in der Troposphäre mittels Gas-Korrelations-Spektroskopie.

§ 709 Ein Beispiel für eine MODIS Aufnahme ist in Abb. 4.9 gegeben. Die von [617] mit gelieferte Erklärung macht deutlich, dass Wolken in der Erdfernerkundung nicht zwingend störend sind sondern mal wieder frei nach dem Motto 'its not a bug, its a feature' zusätzliche Information liefern:

The Caspian Sea and the surrounding landscape were swathed in winter white on January 10, 2008, when this image was captured by the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) on NASA's Terra satellite. A thin layer of snow covered the ground in Russia and Kazakhstan; the Volga River and its distributaries were white ribbons; and a rim of solid ice clung to the shoreline. The northern part of the sea is more likely to freeze than the southern for several reasons: it is shallower, it experiences a more continental climate (colder winter), and it is less salty. South of the loosely packed ice in the northern part of the sea, parallel rows of clouds line up along the north-south axis of the wind. These "streets" of clouds form when cold air blows over the warmer, moister air that sits over the water. When the air over the water is stable, the arriving wind can generate evenly spaced cylinders of

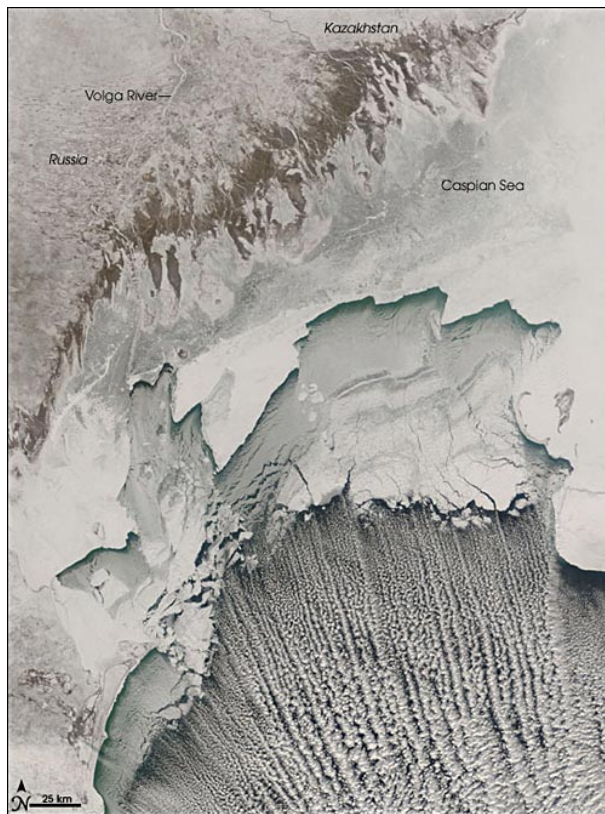


Abbildung 4.9: Kaspisches Meer von MODIS auf Terra aufgenommen [617]

spinning air—horizontal roll vortices. These vortices line up with the direction of the prevailing winds like spinning straws. Clouds form above the “upstroke” part of the spin, where air is rising. Above the “downstroke” side of the spin, where air is sinking, the skies are clear.

Aqua

§ 710 Aqua, ursprünglich EOS-B oder EOS-PM, wurde als zweiter der großen Satelliten im Rahmen von EOS am 4. Mai 2002 gestartet. Auch er bewegt sich auf einer polaren sonnensynchronen Bahn in einer Höhe von ca. 680 km bei einer Inklination von 98.2° .

§ 711 Wie der Name Aqua nahe legt, steht Wasser in jedweder Form im Fokus dieser Mission. Dazu gehört nicht nur das Wasser an der Erdoberfläche sondern ebenso Wasser(dampf) in der Atmosphäre. Für diese Untersuchungen ist Aqua mit sechs Instrumenten bestückt:

- der Atmospheric Infrared Sounder AIRS [305, 450], siehe auch § 559, zur Messung von Temperatur und Feuchtigkeit in der Atmosphäre sowie von Land- und Wasser-Oberflächentemperaturen. Auch Spurengase wie CO lassen sich mit AIRS messen, siehe Abb. 4.10.
- die Advanced Microwave Sounding Unit AMSU-A [307, 624, 415], siehe auch § 561, zur Messung von Feuchtigkeit und Temperatur in der Atmosphäre.
- der Humidity Sounder for Brazil HSB [412] ist ähnlich dem AMSU-B Instrument und sollte Wasserdampfprofile der Atmosphäre messen um vernünftige Algorithmen zur Interpretation von AIRS zu entwickeln. Der Scanner setzte am 5. Februar 2003 aus.
- das Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS AMSR-E [306, 414], siehe auch § 560, untersucht die Eigenschaften der Wolken, Meeres-Oberflächentemperaturen, Windgeschwindigkeiten nahe der Meeresoberfläche sowie Schnee und Eis. Infos als pdf zum Download auch unter [488].
- das Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer MODIS [321, 502] wie auf Terra.

Abbildung 4.10: CO-Säule in der Atmosphäre, gemessen von AIRS auf Aqua [416]. Der hohe CO-Gehalt über dem Amazonas und im südlichen Afrika entsteht durch Brandrodung

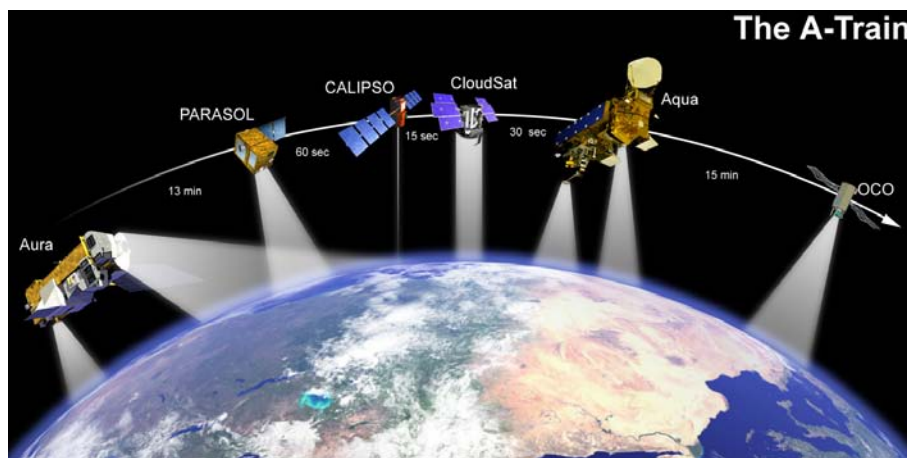
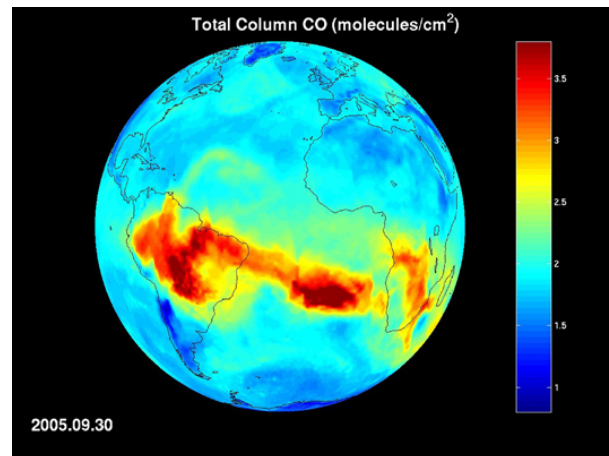


Abbildung 4.11: A-Train Konfiguration zur 3D Darstellung der Atmosphäre [494]

- das Clouds and the Earth's Radiant Energy System CERES, [399] ebenfalls von Terra bekannt und wie dort mit zwei Sensoren vertreten.

A-Train

§ 712 A-Train ist eine Folge von sechs Satelliten in sonnensynchronen Orbits mit einer Flughöhe von ca. 680 m. Diese sind jeweils um wenige Minuten gegen einander versetzt, so dass sich ein echtes 3D-Abbild der Atmosphäre erzeugen lässt; siehe auch Abb. 4.11. Die Konfiguration besteht z.Z. aus den Satelliten Aqua [413], Aura [417], CloudSat [279, 495], PARASOL [281] und CALIPSO [280, 625]; in diesem Jahr soll OCO [467] hinzu kommen.

§ 713 Aura [417] wurde am 15. Juli 2004 gestartet. An Bord befinden sich vier Instrumente:

- HIRDLS (High Resolution Dynamic Limb Sounder [314, 418]) misst die Infrarotstrahlung von Ozon, Wasserdampf, Chlorfluorkohlenwasserstoffen, Methan und verschiedenen Stickstoffverbindungen.
- MLS (Microwave Limb Sounder [320, 419]) misst die von verschiedenen Spurengasen abgegebene Mikrowellenstrahlung.
- OMI (Ozone Monitoring Instrument [323, 420]) arbeitet im sichtbaren und ultravioletten Bereich des elektromagnetischen Spektrums und liefert hochaufgelöste Bilder der globalen Ozonverteilung, von anderen Spurengasen und von Aerosolen.
- TES (Tropospheric Emission Spectrometer [326, 421]) misst die Konzentration von bodennahem Ozon und anderen Spurengasen durch ihre Infrarotemissionen.

§ 714 PARASOL (Polarization & Anisotropy of Reflectances for Atmospheric Sciences coupled with Observations from a Lidar [281]) wurde zur Untersuchung von Aerosolen und Wolken entwickelt und am 18. Dezember 2004 gestartet. Als Mikrosatellit trägt PARASOL nur ein Instrument, ein bildgebendes Radiometer/Polarimeter mit großem Blickwinkel (POLDER: Polarization and Directionality of the Earth's Reflectances). PARASOL dient insbesondere dem Abgleich mit CALIPSO-Messungen.

§ 715 CALIPSO [280, 625] wurde am 28. April 2006 gestartet. CALIPSO trägt drei Instrumente [626]:

- Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization CALIOP ist ein LIDAR (und damit ein aktives Instrument) zur Bestimmung hoch aufgelöster vertikaler Profile von Wolken und Aerosolen.
- Die Wide Field Camera WFC ist eigentlich nur eine modifizierte Version eines kommerziellen Star-Trackers. Sie wurde ausgewählt, da sie gut mit Band 1 von MODIS auf dem Aqua Satelliten verglichen werden kann.
- Das Imaging Infrared Radiometer IIR wird zur Beobachtung von Cirrus-Wolken und atmosphärischen Teilchen verwendet. CALIOP ist jeweils auf das Zentrum des IIR-Blickfeldes ausgerichtet.

§ 716 CloudSat [279, 495] dient der Erforschung von Wolken und Aerosolen. Das einzige Instrument des Satelliten ist das Cloud Profiling Radar CPR. Letzteres leitet sich von typischen meteorologischen Wolkenradars sowie bereits auf Flugzeugen eingesetzten Instrumenten ab.

§ 717 Der letzte, noch fehlende Satellit im A-Train ist das Orbiting Carbon Observatory OCO [467] (Start vorgesehen für Dezember 2008). Sein Ziel ist ein genaues CO₂-Inventar der Atmosphäre; dazu gehört auch ein Abgleich mit AIRS auf Aqua. OCO ist Bestandteil des NASA's Earth System Science Pathfinder ESSP [410] Program.

Literatur

§ 718 Alles was krecht und fleucht oder gekrecht und gefleucht hat oder (vielleicht) einmal kreichen und fleuchen soll ist in Kramer [134] beschrieben, für die einzelnen Missionen finden sich auf den entsprechenden Homepages weitere Literaturhinweise. Und Wikipedia hilft auch hier weiter – und sei es nur, um de Links zu den entsprechenden Missionen oder Instrumenten zu finden.

Kapitel 5

Die erweiterte Perspektive: CAWSES

Empty space is like a kingdom, and heaven and earth no more than a single individual person in that kingdom ... how unreasonable it would be to suppose that besides the heaven and earth which we can see there are no other heavens and no other earths.
Tang Mu, 13. Jahrh.

§ 719 Auf den POES Satelliten der NOAA (siehe Abschn. 4.3) fliegen zwei bisher nicht näher betrachtete Instrumente, der Space Environment Monitor SEM-2 [577] und das Flat Plate Radiometer FPR [520]. Beide dienen nicht der Erdfernerkundung in dem Sinne, dass sie die Erdoberfläche oder die Atmosphäre untersuchen. Sie dienen jedoch der Erderkundung: SEM liefert Informationen über energiereiche Teilchen als eine Quelle von Änderungen in der Atmosphäre (z.B. Ozonabbau); die FPRs erlauben eine globale Strahlungsbilanz erlauben, d.h. den Vergleich der von der Erde emittierten und der von der Erde empfangenen elektromagnetischen Strahlung.

§ 720 Der letzte Punkt weist darauf hin, dass das System Erde–Atmosphäre nicht abgeschlossen ist; stattdessen ist die Sonne die Quelle von Licht und Wärme und damit einerseits der Motor, der die gesamte Dynamik von Ozeanen und Atmosphäre treibt und andererseits auch der Motor, der Leben (Photosynthese) erst ermöglicht. Das Programm Climate And Weather in the Sun–Earth System CAWSES [273, 274] untersucht diese Zusammenhänge in verschiedenen internationalen Kollaborationen genauer.

§ 721 Um die Zusammenhänge zwischen Sonne und Erde zu verstehen, müssen wir jedoch erst einmal die treibende Kraft, die Sonne, und ebenso die Vermittlungswege, den interplanetaren Raum, verstehen. Auch ein Blick auf die und ein Vergleich mit den anderen Planeten kann zum Verständnis der Solar–Terrestrischen Beziehungen hilfreich sein. Diese Bereiche werden im wesentlichen mit Satelliten erforscht, jedoch werden neben remote sensing auch in-situ Messungen vorgenommen.

5.1 Das nahe Erdumfeld

§ 722 Einen kurzen Einblick in das nahe Erdumfeld haben wir bereits in Abschn. 3.1.1 und 3.1.2 erhalten. In diesem Abschnitt werden wir als Ergänzung zu dem für global change wichtigen Aspekt der Strahlungsbilanz der Erde auch die Magnetosphäre und die energiereichen Teilchen genauer betrachten – letztere greifen zumindest in hohen Breiten über Anregung und Ionisation auch in die Chemie der Atmosphäre ein. Die stärkste treibende Kraft auf die Atmosphäre ist jedoch die Sonne.

5.1.1 Die Strahlungsbilanz

§ 723 Anthropogener Treibhauseffekt, Klimaveränderungen usw. werden viel diskutiert. Aber selbst eine reine CO₂-Atmosphäre könnte zu einem eisigen Planeten führen, wenn die Einstrahlung zu gering ist. Oder kurz: die treibende und Temperatur bestimmende Kraft ist die Solarkonstante S_{\odot} , der von der Sonne emittierte Strahlungsstrom gemessen am Ort der Erde. Die Zusammensetzung der Atmosphäre bestimmt lediglich, welcher Anteil der Strahlungsenergie ungenutzt reflektiert wird und welcher durch einen Treibhauseffekt recyclet der Erde nochmals zugeführt wird und somit zur Erwärmung beiträgt.

§ 724 Für alle Abschätzungen von Klimaänderungen bzw. der Untersuchung beobachteter Klimaänderungen ist daher die Kenntnis der Solarkonstante von Bedeutung. Insbesondere stellt sich die Frage: die Sonne ist ein variabler Stern, angezeigt z.B. durch die Sonnenflecken – ist der von der Sonne emittierte Strahlungsstrom vielleicht geringer, wenn es viele Flecken gibt? Dann wäre die Solarkonstante nicht konstant.

§ 725 Diese Frage lässt sich nur mit Hilfe von Satelliten untersuchen: zum einen, da sich der Strahlungsstrom nur oberhalb der stark in die Strahlungsbilanz eingreifenden Atmosphäre messen lässt. Zum anderen, da sich Änderungen von Parametern natürlich nur durch langdauernde Messungen entdecken lassen – die Sonnenfleckenzahl variiert mit einem ungefähr 11 Jahre dauernden Zyklus, d.h. eine sinnvolle Messung muss über mindestens 11 Jahre erfolgen.

Das Problem

§ 726 Die Erde empfängt elektromagnetische Strahlung von der Sonne; und sie emittiert auf Grund ihrer Temperatur elektromagnetische Strahlung. Da sich die Erde weder erwärmen noch abkühlen soll, muss die absorbierte Strahlung gleich der emittierten Strahlung sein: $q_{\text{in}} = q_{\text{out}}$.

§ 727 Der von der Erde absorbierte Strahlungsstrom ist bestimmt durch die Solarkonstante S_{\odot} , d.h. den von der Sonne emittierten Strahlungsstrom am Ort der Erde. Von diesem Strahlungsstrom wird der durch die Albedo A beschriebene Anteil von Wolken, Atmosphäre und Erdoberfläche direkt in den Weltraum zurück reflektiert, d.h. zur Absorption steht nur der Anteil $(1 - A)S_{\odot}$ zur Verfügung. Dieser Strahlungsstrom wird über die Querschnittsfläche πR_{E}^2 absorbiert. daher ist $q_{\text{in}} = (1 - A)S_{\odot}\pi R_{\text{E}}^2$.

§ 728 Gleichzeitig emittiert die Erde einen Strahlungsstrom, der dem eines schwarzen Strahlers mit einer Effektivtemperatur T_{eff} entspricht; gemäß Stefan–Boltzmann Gesetz also σT_{eff}^4 . Da die Temperaturunterschiede zwischen Tag- und Nachtseite vergleichsweise gering sind, erfolgt die Emission in erster Näherung gleichmäßig über die gesamte Erdoberfläche $4\pi R_{\text{E}}^2$ mit der einheitlichen Effektivtemperatur. Daher ist $q_{\text{out}} = 4\pi R_{\text{E}}^2\sigma T_{\text{eff}}^4$. Im Gleichgewicht gilt damit

$$(1 - A)S_{\odot}\pi R_{\text{E}}^2 = 4\pi R_{\text{E}}^2\sigma T_{\text{eff}}^4 .$$

Im Gleichgewicht ergibt sich die Effektivtemperatur

$$T_{\text{eff}} = \sqrt[4]{\frac{(1 - A)S_{\odot}}{4\sigma}} . \quad (5.1)$$

§ 729 Mit der nominellen Solarkonstante von $S_{\odot} = 1367 \text{ W/m}^2$ und einer mittleren Albedo $A = 0.3$ ergibt sich eine Effektivtemperatur von ca. 250 K. Dieser Wert liegt um mehr als 30 K unter der beobachteten mittleren Temperatur von 8°C. Die Differenz wird als der natürliche Treibhauseffekt bezeichnet. Der Unterschied ist durch das einfache Modell begründet. Unsere Abschätzung der Effektivtemperatur berücksichtigt keine Atmosphäre, abgesehen von dem in der Albedo enthaltenen Anteil der an der Atmosphäre reflektierten solaren Einstrahlung.

§ 730 Aber ist das Modell damit falsch? Falsch ist nur unser Vergleich mit der mittleren Bodentemperatur. Das Gleichgewicht aus Ein- und Ausstrahlung muss an der Oberkante des Systems Erde–Atmosphäre erfüllt sein, d.h. ein Beobachter im Weltraum sollte aus dem von der Erde emittierten Strahlungsstrom eine Effektivtemperatur von ca. 250 K abschätzen. Wenn der Beobachter über ein hinreichend gutes Teleskop verfügt, wird er aber auch sehen, dass sich ein relativ großer Anteil des Erdbodens seiner Beobachtung entzieht, da er unter Wolken verborgen ist.¹ Daher kann der Beobachter aus seiner Messung keine Aussagen über die Bodentemperatur der Erde machen.

§ 731 Auch die Wärmeströme am Erdboden zeigen an, dass die Bodentemperatur nicht gleich der Effektivtemperatur sein sollte: der Boden gibt Wärme ab durch Abstrahlung, durch Konvektion und durch den Transport latenter Wärme.² Alle drei Prozesse führen dazu, dass sich die Atmosphäre erwärmt. Diese strahlt aber ihrerseits gemäß Stefan–Boltzmann. Von dieser Strahlung gelangt ein Teil in die höheren Atmosphärenschichten und damit nach außen, ein Teil wird jedoch vom Erdboden absorbiert und führt zu dessen weiterer Erwärmung. Der erste Teil ist der, der zur Effektivtemperatur beiträgt, der letztere Teil ist der Treibhauseffekt.

§ 732 Um den Einfluss der Atmosphäre und insbesondere der im Rahmen des global change diskutierten treibhauswirksamen Spurengase auch quantitativ zu verstehen, ist eine genaue Untersuchung der Strahlungsbilanz notwendig. Dazu gehört neben der Messung der Konzentrationen und Verteilungen von Spurengasen und Temperaturen durch Sounder (siehe Abschn. 3.5) auch eine genaue Kenntnis der Albedo A und der Solarkonstante S_{\odot} .

§ 733 Seit 1978 werden Satelliteninstrumente zur Messung der Solarkonstanten außerhalb der störenden Erdatmosphäre verwendet. Entsprechende Instrumente befinden sich z.B. auf den amerikanischen Wettersatelliten der Nimbus-Serie (seit 1978 [558]) sowie auf der Solar Maximum Mission (SMM, 1980-1989 [493, 442, 490]) und auf ERBS (Earth Radiation Budget Satellite [514]). Diese Instrumente erlauben durch zusätzliche Messung der terrestrischen Ausstrahlung eine Überprüfung der Strahlungsbilanz der Erde. Im Rahmen der Messgenauigkeiten sind dabei Ein- und Ausstrahlung gleich, d.h. die Strahlungsbilanz der Erde ist ausgeglichen, wie wir es bei der Herleitung von (5.1) angenommen haben.

Messverfahren

§ 734 Die Solarkonstante ist der gesamte von der Sonne emittierte Strahlungsstrom. das solare Spektrum lässt sich annähern durch eine Planck-Kurve für einen schwarzen Strahler mit einer Temperatur von 6000 K. Die solare elektromagnetische Strahlung lässt sich in fünf Wellenlängenbereiche einteilen. Diese haben teilweise unterschiedliche Entstehungsorte und -mechanismen auf der Sonne und liefern unterschiedliche Beiträge zum gesamten Energiefluss der Sonne:

- Röntgenstrahlung und extremes Ultraviolett (EUV) mit Wellenlängen unter 1800 Å tragen ungefähr 10⁻³% zum Energiefluss der Sonne bei. Sie entstehen in der Korona bzw. in der Chromosphäre.
- Ultraviolett (UV) mit Wellenlängen zwischen 1800 und 3500 Å trägt zu 9% zum Energiefluss bei und entsteht in der Photosphäre und in der Korona.
- sichtbares Licht zwischen 3500 und 7500 Å trägt mit 40% zum Energiefluss bei. Es entsteht in der Photosphäre, genauso wie die

¹Die Venus ein Musterbeispiel für den Unterschied zwischen der Effektivtemperatur und der Bodentemperatur. Zwar befindet sich die Venus näher an der Sonne als die Erde, sie reflektiert auf Grund ihrer großen Albedo von ca. 0.65 jedoch einen großen Teil der einfallenden Strahlung – daher ist die Venus so hell. Aus der Strahlungsbilanz ergibt sich ebenfalls eine Effektivtemperatur von ca. 250 K – bei einer Bodentemperatur von 460°C.

²Der Transport latenter Wärme ist wie die Konvektion an die Bewegung von Materie gebunden. Ist die Luft vollständig trocken, so ist Konvektion der einzige Wärmetransport, abgesehen vom Strahlungstransport. Enthält die Luft dagegen Wasserdampf, so kann dieser auf Grund der mit der Abkühlung der aufsteigenden Luft kondensieren. Die latente Wärme ist die bei diesem Phasenübergang frei werdende Kondensationswärme – und damit das Gegenteil der Verdunstungskälte.

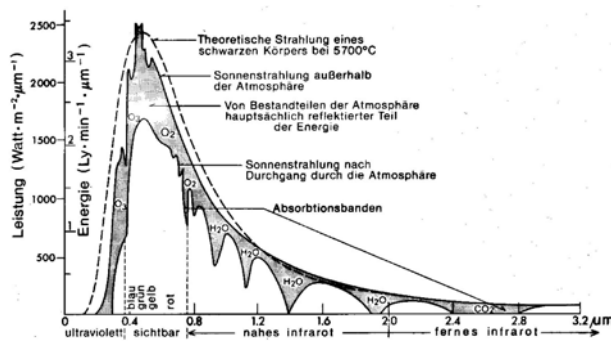


Abbildung 5.1: Energiespektrum der solaren Strahlung vor und nach dem Durchgang durch die Erdatmosphäre. Die gestrichelte Linie gibt zum Vergleich die theoretische Energieverteilung für einen schwarzen Körper mit der Oberflächentemperatur der Sonne [251]

- Infrarot-Strahlung (IR, 7500 \AA bis 10^7 \AA), die 51% zum Energiefluss beiträgt.
- Einen extrem geringen Beitrag liefert die Radioemission oberhalb 1 mm ($10^{-10}\%$), die wie die Röntgenstrahlung in der Korona entsteht.

§ 735 Abbildung 5.1 gibt das Energiespektrum der solaren Strahlung für den Bereich UV bis Infrarot, d.h. die Verteilung der von der Sonne bei bestimmten Frequenzen abgestrahlten Energie. Die obere durchgezogene Kurve gibt die spektrale Verteilung außerhalb der Erdatmosphäre, die untere durchgezogene Kurve die am Erdboden gemessene Verteilung. Die gestrichelte Linie gibt die theoretische spektrale Verteilung für einen schwarzen Körper mit einer Oberflächentemperatur von 6000 K (in Übereinstimmung mit der oben aus der Leuchtkraft abgeschätzten Effektivtemperatur) wieder. Abgesehen vom ultravioletten Bereich, in dem die Sonne anscheinend wesentlich weniger Energie abstrahlt als ein schwarzer Körper dieser Temperatur, gibt die Beschreibung durch einen schwarzen Strahler die solare Emission relativ gut wieder.

§ 736 Die am Erdboden ankommende solare Strahlung zeigt in ihrer Energieverteilung die folgenden Eigenschaften:

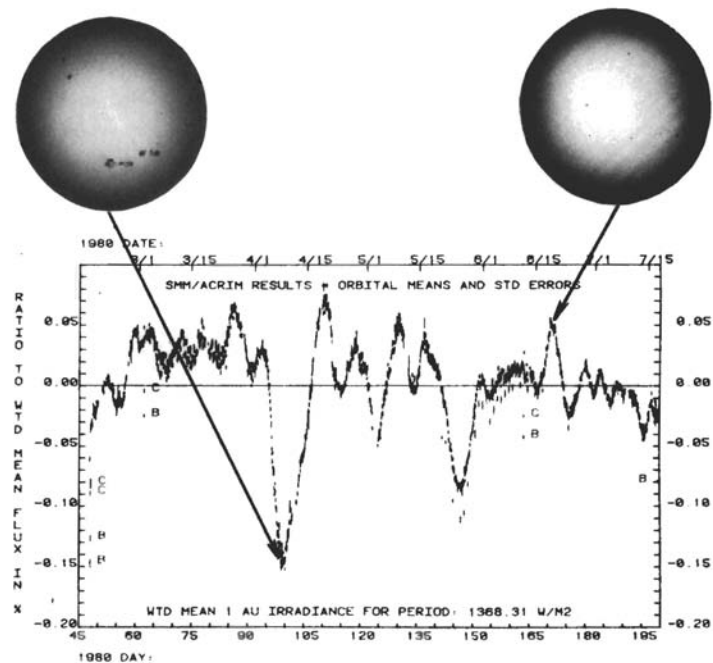
- Das Energiemaximum liegt im sichtbaren Spektralbereich bei 500 nm bis 600 nm (grün bis gelb). Damit stimmt das Energiemaximum der Strahlung mit dem Empfindlichkeitsmaximum des menschlichen Auges überein (bzw. das Auge hat sich im Laufe der Evolution an dieses Maximum angepasst).
- Rasche Abnahme der Energie im ultravioletten Bereich durch Absorption in der Ozonschicht (das ist dem Leben sehr förderlich).
- Im infraroten Bereich gelangt ein großer Teil der solaren Strahlung nicht bis auf den Erdboden sondern wird bereits in der Atmosphäre absorbiert. Die Absorption erfolgt dabei hauptsächlich durch Wasserdampf und Kohlendioxid, die Absorber in diesem Bereich sind die gleichen, die auch die terrestrische Ausstrahlung absorbieren.

Dieser letzte Punkt ist insbesondere für das Verständnis des Treibhauseffektes (wohlgemerkt, hier ist nicht alleine der durch den Menschen verstärkte Treibhauseffekt gemeint, sondern der allgemeine Treibhauseffekt).

§ 737 Die Messung der Solarkonstanten entspricht der Messung eines Energiestroms über einen weiten Bereich von Wellenlängen, wobei die größten Anteile im sichtbaren und Infraroten liegen. Damit lässt sich die Strahlung nicht über die Effekte individueller Photonen nachweisen sondern nur über die kollektiven Effekte vieler Photonen, d.h. die Erwärmung durch Absorption. Das hierfür typischerweise verwendete Messinstrument ist das Bolometer. Seinen modernen Vetter haben wir bereits im Zusammenhang mit der Messung thermischer Infrarotstrahlung als Mikrobolometer kennen gelernt (siehe auch § 442).

§ 738 Im Gegensatz zum Mikrobolometer – und in Übereinstimmung mit der Fragestellung – wird vom Bolometer keine Imaging gefordert. Stattdessen wird der Strahlungsstrom über die empfindliche Fläche des Bolometers integriert.

Abbildung 5.2: Schwankungen der Solarkonstanten innerhalb von 155 Tagen zur Zeit des solaren Maximums 1980. Man erkennt deutlich den Einfluss von Flecken auf die Solarkonstante. Die Gesamtschwankung liegt nur im Promillbereich ([102] in [263])



§ 739 Ein Standardinstrument zur Messung der Solarkonstanten ist der Active Cavity Radiometer Irradiance Monitor ACRIM [266], geflogen auf Solar Maximum Mission SMM [493], dem Upper Atmospheric Research Satellite UARS [432] und auf ACRIMSat [449]. Die Kombination der drei Satelliten erlaubt, abgesehen von einer Lücke in den 1990ern eine kontinuierliche Messung der Solarkonstanten seit 1980 – das SMM-ACRIM war das erste Instrument, das die Variabilität der Solarkonstante nachgewiesen hat (siehe auch Abb. 5.3).

§ 740 Als Beispiel sei hier das ACRIM II Instrument [636] auf UARS vorgestellt. Es besteht aus drei Active Cavity Radiometers (ACR's) (Type V). Die ACRs sind selbst-kalibrierende Pyrheliometer mit einer gleichförmigen Empfindlichkeit vom extremen UV bis zum fernen IR. Das Messprinzip basiert auf einem Vergleich der Erwärmung des Detektors durch den Gesamtstrahlungsstrom von der Sonne mit der in einem in direktem Kontakt zum Detektor stehenden Heizelement dissipierten elektrischen Energie. Die Genauigkeit der Messung ist im wesentlichen durch drei Fehlerquellen bestimmt: die Kenntnis des effektiven Absorptionsvermögens des Detektors für die einfallende Strahlung, die Kenntnis der aktiven beleuchteten Fläche des Detektors und die genaue Definition des Heizelements.

§ 741 Die Messung wird jeweils mit geöffnetem und geschlossenem Shutter durchgeführt: auf diese Weise kann für die Absorption von Hintergrundstrahlung korrigiert werden. Letztere ergibt sich im IR durch die von Null verschwindende Temperatur des Messraumes, in den anderen Wellenlängenbereichen durch kleine Undichtigkeiten des Gehäuses. Die Dauer eines Messzyklus aus offenem und geschlossenem Shutter beträgt 131 Sekunden; die Reihenfolge der Messzyklen ist symmetrisch, um systematische Fehler zu vermeiden. Korrekturen der so gemessenen Größe erfolgen für die Temperaturabhängigkeit von Sensor und Elektronik, die Winkel, unter dem die Sonne betrachtet wird, sowie den veränderlichen Abstand zwischen Sonne und Satellit inklusive der relativen Geschwindigkeit zwischen beiden. Damit soll sich eine relative Genauigkeit der Tagesmittel der Solarkonstanten von 5 ppm ergeben.

Die Solarkonstante

§ 742 Und wie sieht es mit der Solarkonstanten aus? Würden wir überhaupt eine Änderung der Solarkonstanten im Laufe des Solarzyklus erwarten? Sollte die Solarkonstante im Maximum des Zyklus nun zunehmen aufgrund der UV- und Radioemission im Zusammenhang

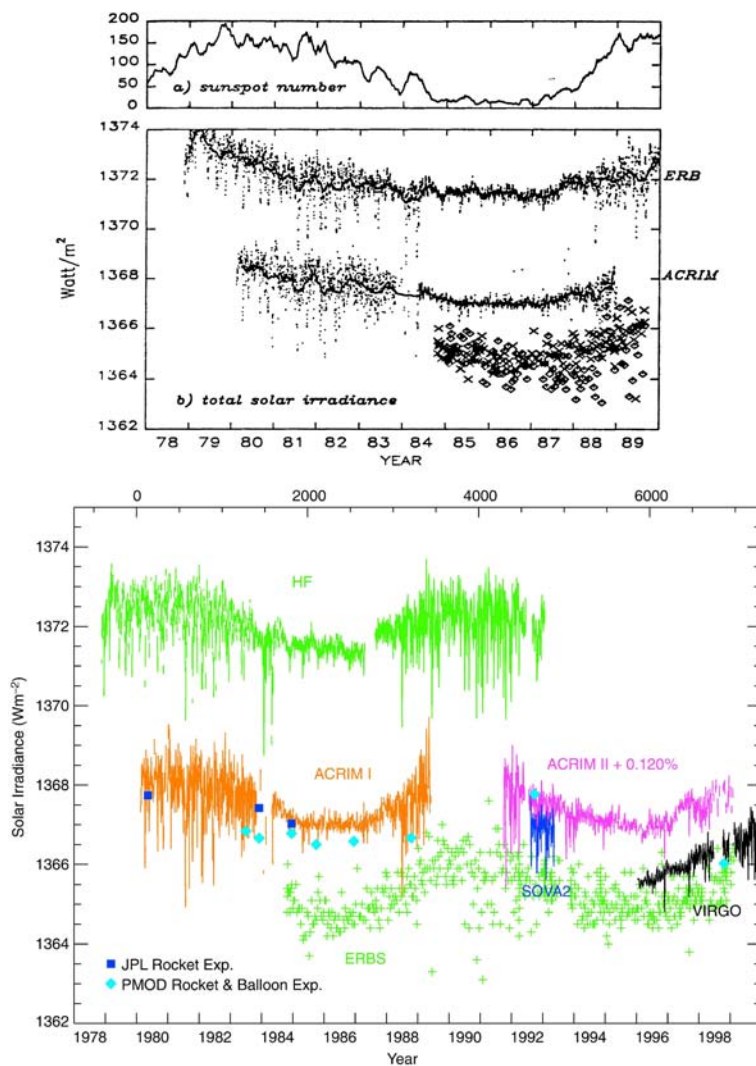


Abbildung 5.3: Zeitverlauf der Sonnenfleckenanzahl (oben) und der Solarkonstanten (Mitte) im Zeitraum von 1978 bis 1989, zur Erklärung der einzelnen Kurven vergleiche Text [146]; im unteren Teil Fortschreibung der Kurven bis 2000 [105]

mit solaren Eruptionen (Flares), oder wird die Solarkonstante aufgrund der großen Zahl der Flecken (sie sind kälter als ihre Umgebung und emittieren daher weniger elektromagnetische Strahlung) eher geringer?

§ 743 Dazu zeigt Abb. 5.2 die relative Änderung der Solarkonstante, beobachtet über einen Zeitraum von 155 Tagen (ungefähr die erste Hälfte des Jahres 1980, also in der Nähe des solaren Maximums). Man erkennt deutlich den Einfluss einzelner Fleckengruppen, die relative Änderung im solaren Strahlungsfluss entspricht dabei der relativen von den Flecken bedeckten Fläche der Sonne. Die Gesamtänderung des solaren Flusses beträgt nur wenige Promill. Die waagerechte Linie entspricht dem mittleren Fluss während des Beobachtungszeitraumes, die nach oben ausweichenden Zacken geben den maximalen Fluss wieder.

§ 744 Aufgrund der großen Variabilität der Sonne während dieser Zeit ist eine 27-tägige Periodizität (im Zusammenhang mit der Sonnenrotation) nur schwach zu erahnen. Pfeile markieren einen willkürlichen 27-Tage Rythmus. Zwar sind stets Maxima der Solarkonstanten in unmittelbarer Nähe dieser Marker, die Abweichungen sind jedoch zu groß, als dass dieser Zusammenhang statistisch signifikant wäre. Naheliegendste Erklärung ist das Auftauchen neuer und das Verschwinden alter Fleckengruppen während dieser Zeiten.

§ 745 Nachdem wir hier Schwankungen der Solarkonstante auf Zeitskalen von Monaten be-

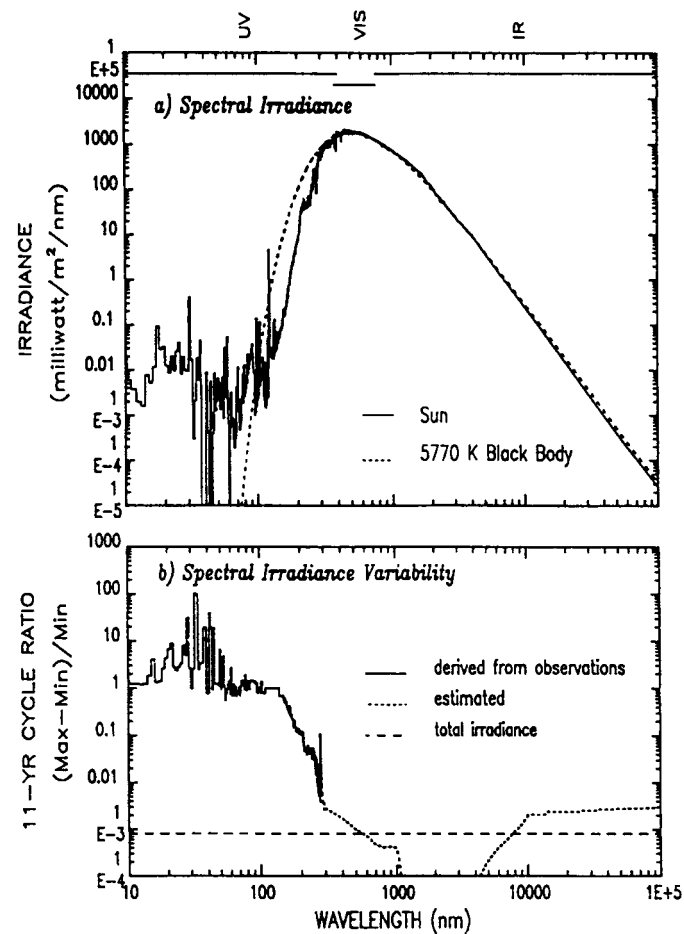


Abbildung 5.4: Solares Spektrum im Sonnenfleckenminimum (oben) und Variabilität der solaren Ausstrahlung mit dem Sonnenfleckenzyklus [?]

trachtet haben, wollen wir unsere Betrachtung auf längere Zeitskalen ausdehnen. Abbildung 5.3 zeigt die Zahl der Sonnenflecken (oben) und den Zeitverlauf der Solarkonstanten (Mitte) für den Zeitraum von 1978–1989. Die Daten für die Solarkonstante sind von verschiedenen Instrumenten bestimmt; obere Kurve ERB (Earth Radiation Budget) auf Nimbus 7 (seit 1978), untere Kurve ACRIM (Active Cavity Radiometer Irradiance Monitor) auf SMM (beide Instrumente bestimmen des solaren Fluss täglich), die Kreuze sind von ERBS (Earth Radiation Budget Satellite), die Rhomben von NOAA 9, die beide nur jeweils einige male pro Monat messen. Den Kurven bei ERB und ACRIM sind 81-Tage laufende Mittel überlagert, die die Kurzzeitschwankungen aufgrund der Entwicklung bzw. des Verschwindens aktiver Regionen (vgl. Abb. 5.2) herausfiltern sollen. Die Verschiebungen der einzelnen Kurven gegeneinander beruhen auf Ungenauigkeiten in der Kallibrierung der Instrumente. Dieser Kallibrierungsfehler ist um mehr als eine Größenordnung größer als der Messfehler der einzelnen Instrumente, ja selbst größer als die Variation der Solarkonstanten über den betrachteten Zeitraum!

§ 746 In den Profilen zeigt sich ein Abwärtstrend der Solarkonstante zusammen mit dem Abklingen solarer Aktivität zwischen 1980 und 1986 sowie ein erneuter Anstieg im Zusammenhang mit dem Beginn des neuen Solarzyklus. Die Amplitude der Änderungen beträgt ca. 0.1%. Diesem Langzeittrend sind kurzzeitige Variationen von bis zu 0.2% überlagert, wie auch aus Abb. 5.2 ersichtlich. Da sich die Beobachtungen nur über einen Zeitraum von ca. 10 Jahren erstrecken, d.h. nur in der Größenordnung der gesuchten Zykluslänge liegen, sind sie alleine noch kein Beweis für eine zyklische Änderung des solaren Flusses. Daher ist im unteren Teil der Abbildung die Fortsetzung dieser Beobachtungen bis zum Jahr 2000 gezeigt. An der Abbildung wird wieder das Problem langer Messreihen deutlich: da die Instrumen-

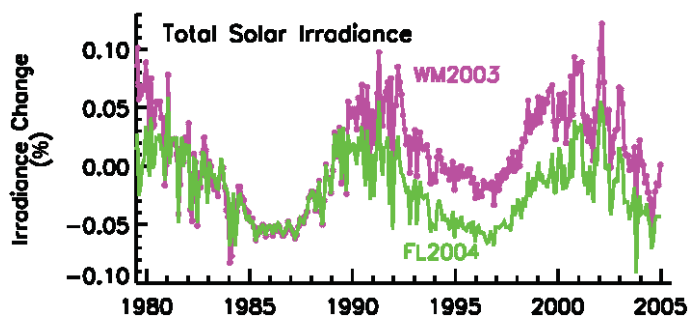


Abbildung 5.5: Rekonstruktion der Solarkonstante über 25 Jahre, Kurve FL aus [65], Kurve WM aus [253], Abbildung aus [106]

te zwischenzeitlich gewechselt werden mussten, sind diese Messreihen nicht homogen: hätte man nur zwei Messinstrumente ohne zeitlichen Überlapp (z.B. ACRIM I und Virgo oder HF und VIRGO), so könnte man zu sehr interessanten Theorien bezüglich der Veränderung der Solarkonstanten gelangen.

§ 747 Die Zunahme des solaren Flusses mit der Zahl der Sonnenflecken deutet daraufhin, dass es noch eine zusätzlich Quelle solarer Emission während des solaren Maximums geben muss, die die Abnahme des Flusses durch die Sonnenflecken überkompensiert. Als Ursache werden hier helle Fackeln in den polaren Bereichen der Sonne vermutet sowie das insbesondere in der CaII-Linie deutlich sichtbare magnetische Netzwerk der Photosphäre. Aufgrund dieses noch nicht völlig verstandenen Aufhellens ist es nicht zuverlässig möglich, aus der Sonnenfleckenzahl und den beobachteten Variationen der Solarkonstanten in den vergangenen 10 Jahren auf längerfristige Variationen zurückzuschließen, d.h. es gibt noch keine Umrechnungstabelle von Fleckenanzahl oder Fleckenfläche auf Solarkonstante.

§ 748 Die Variabilität der Sonne ist in den kurzen und langen Wellenlängenbereichen wesentlich größer als im sichtbaren Bereich (der andererseits aber aufgrund des großen Flusses die Solarkonstante bestimmt). Abbildung 5.4 zeigt dazu die spektrale Variation der solaren Strahlung während eines Solarzyklus. Während die Variabilität des Gesamtflusses bei 0.1% liegt, kann die solare Emission im UV-Bereich während des Maximums um bis zu zwei Größenordnungen über der ruhigen Sonne liegen.

§ 749 Abbildung 5.5 gibt einerseits die Erweiterung von Abb. 5.3 für einen längeren Zeitraum, andererseits auch eine Warnung beim Umgang mit Satellitendaten zur Untersuchung von global change: die Rekonstruktionen³ der Solarkonstante aus [65] und [253] ist deutlich unterschiedlich und zeitlich veränderlich. So sind die Maxima der Solarkonstante in [65] generell niedriger während das erste Minimum Mitte der 1990er in beiden eine vergleichbare Solarkonstante hat, im folgenden Solarzyklus dagegen bei [65] geringer ist. Zwei Faktoren tragen zu diesen Abweichungen bei: (a) die einzelnen Instrumente sind nicht auf einen absoluten Wert geeicht, wie bereits in Abb. 5.3 deutlich wurde und (b) über Jahre oder Jahrzehnte altern die Instrumente.

§ 750 Aus letzterem Grund ist auch das Standardverfahren beim Ersetzen eines Instruments durch ein neueres Instrument problematisch: normalerweise lässt man beide Instrumente für eine Zeit gleichzeitig messen und verschiebt dann die Messdaten des neuen Instruments so, dass sie mit denen des alten Instruments übereinstimmen. Damit werden die neuen Daten aber auf durch Alterung verfälschte Daten kalibriert. Die Alterung des neuen Instruments führt dann wieder zu einer Verfälschung der Messdaten, d.h. das nächste Instrument wird auf gealterte, an einem gealterten Instrument kalibrierte Werte kalibriert. Führt die Alterung zu einem reduzierten Ansprechvermögen, so wird auf diese Weise mit jedem Instrument ein niedrigerer – und im Laufe der Zeit weiter abnehmender – Wert bestimmt: in den Messdaten zeigt sich ein Trend ohne dass dieser in den realen Daten vorhanden sein muss.

³Eine Rekonstruktion in irgendeiner Form ist leider erforderlich, da eine Anpassung der Messungen der verschiedenen Instrumente erfolgen muss – mit den Rohdaten wie in Abb. 5.3 lässt sich nichts anfangen. Eine Anpassung an einen absoluten Wert hat man auch in dieser Rekonstruktion nicht versucht.

§ 751 Letzteres gilt für jede Art von Instrumententyp, egal ob er sich im Orbit befindet oder auf dem Boden. Auch den Meteorologen ist das Problem der Instrumentenalterung und damit verbunden die Schwierigkeiten, eine homogene Datenreihe zu erstellen, wohl bekannt; [15] stellt dieses Problem recht gut dar.

Einschub: alternde Satelliteninstrumente

§ 752 Die Alterung von Satelliteninstrumenten hat vielfältige Ursachen. Zur Alterung trägt auch die nicht gerade freundliche Umgebung bei. Die wesentlichen Einflussgrößen sind die ionisierende Strahlung, d.h. die harte elektromagnetische Strahlung ebenso wie die energie-reichen Teilchen. Während erstere nur die Oberfläche von Raumfahrzeug und Detektor trifft, kann letztere bis in den Detektor und die Elektronik-Box eindringen.

§ 753 Häufige Ionisation führt in vielen Detektoren zu einer Veränderung der Detektor-empfindlichkeit und damit des Ansprechvermögens. In der Folge werden weniger Photonen/Teilchen nachgewiesen oder diesen wird eine zu geringe Energie zugewiesen. Diese Form der Alterung lässt sich weder vermeiden noch korrigieren. Allerdings kann man, wenn möglich, eine wohl definierte Quelle der mit Hilfe des Detektors nachzuweisenden Strahlung mitnehmen und den Detektor von Zeit zu Zeit neu Kalibrieren: dazu überprüft man das Ansprechvermögen des Detektors gegenüber diesem Standardstrahler.

§ 754 Ionisation in der Elektronik führt leicht zum Klappen eines Bits. Im Datenspeicher ist dies nicht relevant – das ist zwar ein fehlerhafter Datenpunkt, aber Messfehler kommen vor. Wesentlich problematischer ist das Umklappen eines Bits in einem Programmspeicher – dies kann zu einer permanenten Fehlfunktion führen. Daher sind moderne Satelliteninstrumente so ausgelegt, dass man ihnen die Software neu aufspielen kann bzw. auch neuere Versionen der Software auf den Satelliten bringen kann.

Die Albedo

§ 755 Die Albedo ist der von der Erde reflektierte Anteil der einfallenden solaren Einstrahlung. Die Reflektion erfolgt an Wolken, in der Atmosphäre oder an der Erdoberfläche. Die Reflektion hängt zwar von der Wellenlänge des Lichts ab, ändert diese aber nicht. Daher umfasst der reflektierte Anteil der solaren Einstrahlung den gleichen Frequenzbereich wie die einfallende Strahlung.

§ 756 Die Albedo als das Verhältnis von reflektierter zu einfallender Strahlung lässt sich daher mit zwei Bolometern bestimmen: das eine blickt nach oben, das andere nach unten.

§ 757 Dabei ergibt sich jedoch ein Problem: wenn beide Bolometer das vollständige solare Spektrum abdecken, misst das nach unten blickende Bolometer auch die vom System Erde/Atmosphäre emittierte IR Strahlung, siehe § 758. Dieses Problem lässt sich auf zwei Weisen lösen:

- Reduktion des Wellenlängenbereichs derart, dass die terrestrische Ausstrahlung nicht mit gemessen wird. Dann geht zwar auch ein Teil des solaren Spektrums verloren, dieses ist jedoch nur sehr klein.
- separate Messung der terrestrischen Ausstrahlung und Abzug derselben vom gesamten nach oben gerichteten Strahlungsstrom. Damit macht man den gleichen Fehler, da die terrestrische Ausstrahlung natürlich auch den Anteil der reflektierten solaren Strahlung enthält.

Terrestrischer Ausstrahlung

§ 758 Die Erde ist in erster Näherung ein schwarzer Körper mit einer Temperatur von ca. 250 K, entsprechend einer Wellenlänge im Maximum der Planck'schen Kurve von ca. 12 μm . Der von der Erde emittierte Strahlungsstrom hat daher sein Maximum bei deutlich größeren

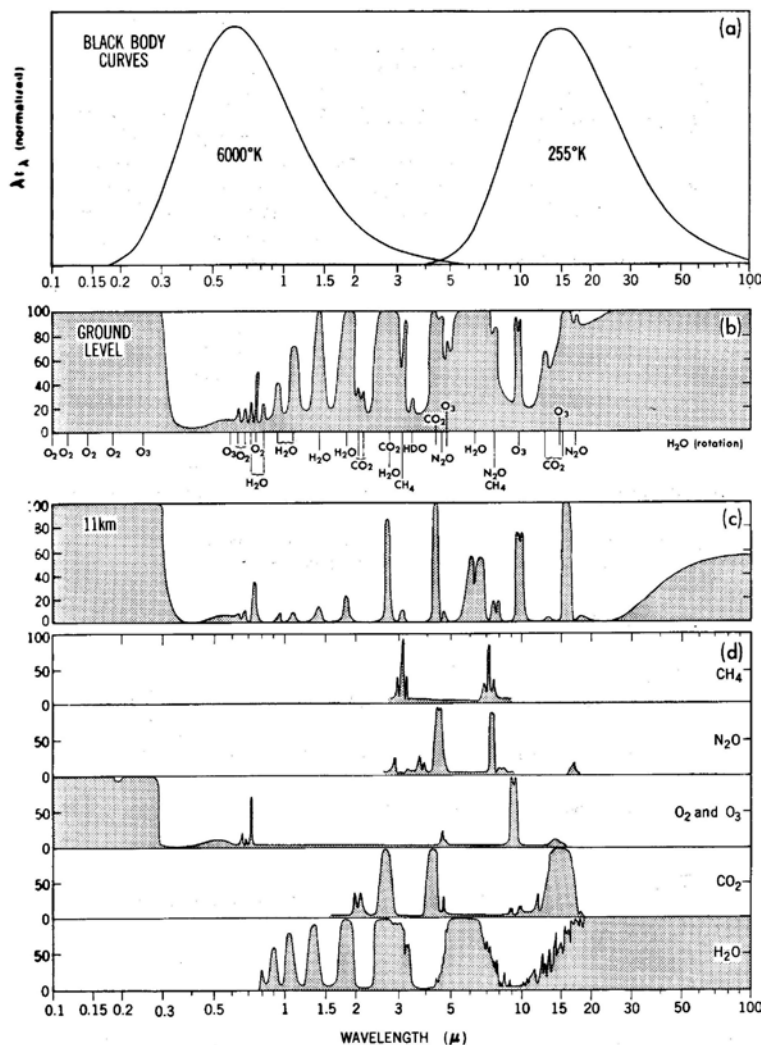


Abbildung 5.6: Effektivtemperaturen von Sonne und Erde und Lage der Absorptionsbanden [183]

Wellenlängen als die solare Strahlung. Trägt man beide Planck-Kurven jeweils auf das Maximum normiert auf, so erscheinen sie gegeneinander verschoben und disjunkt, vgl. Abb. 5.6. Letzteres wird als Begründung dafür verwendet, dass Spurengase die einfallende kurzwellige solare Strahlung in anderer Weise beeinflussen als die langwellige terrestrische Ausstrahlung.

Zwischenrechnung 18 Schätzen Sie den von der Erde emittierten Strahlungsstrom ab; vergleichen Sie mit dem Strahlungsstrom eines Körpers mit einer Effektivtemperatur von 6000 K sowie mit der Solarkonstante.

Verständnisfrage 34 Die terrestrische Ausstrahlung kann im Prinzip natürlich auch mit den bereits bekannten im thermischen IR messenden Instrumenten bestimmt werden. Wie geht man bei der Gesamtstrahlung mit den atmosphärischen Fenstern um? Sind diese zu berücksichtigen oder nicht?

§ 759 Und Ergebnisse? Die Ergebnisse werden mit zunehmender Komplexität der Messgeräte ebenfalls schwieriger zu interpretieren. Zum einen besteht immer noch das Problem der Kalibrierung, zum anderen lassen sich zwar leicht globale Karten von langwelliger oder kurzwelliger Einstrahlung und langwelliger oder kurzwelliger Ausstrahlung oder dem lokalen Nettostrom darstellen. Die Interpretation dieser Daten ist jedoch alles andere als trivial.

- Der lokale Nettostrom ist kaum jemals Null – das ist kein Wunder, da die Erde auf der Nachtseite zwar Strahlung emittiert aber keine empfängt. Wenn die Erde nicht dauerhaft

abkühlen soll, muss sie zwangsläufig auch auf der Tagseite eine lokal unausgeglichene Strahlungsbilanz haben. Außerdem wird ein großer Teil der am Äquator eingestrahelten Energie über die Zirkulationssysteme von Atmosphäre und Ozean in höhere Breiten transportiert.

- Lokal zeigt die Emission der Erde zeitliche Variationen auf vielen verschiedenen Skalen (Tagesgang, Jahresgang, Variationen auf längeren Skalen). Welche Mittlungsperioden sind für die Bestimmung einer Strahlungsbilanz sinnvoll?
- Gerade in niedrigen Breiten variiert die terrestrische Ausstrahlung stark mit dem El Niño. Haben die Ozeane eine Rolle in der Strahlungsbilanz in ihrer Eigenschaft als Zwischenspeicher von Wärme? Über welche Zeitskalen muss gemittelt werden?

5.1.2 Energiereiche Teilchen

§ 760 Energiereiche geladene Teilchen lassen sich nicht durch remote sensing nachweisen (außer, sie werden so stark beschleunigt, dass sie Röntgenstrahlung erzeugen) sondern nur in-situ.⁴ Vom Messprinzip her sind diese Instrumente daher nicht Bestandteil der Erdfernerkundung – sie fliegen teilweise als Monitoring Instrumente (SEM, [577]) zum Verständnis des näheren Erdumfeldes und insbesondere der auf den Satelliten wirkenden Einflüsse; teilweise fliegen sie auch als eigenständige Instrumente zur Untersuchung eben dieser Teilchen. Beginnen wir mit dem Messprinzip.

Wechselwirkung geladene Teilchen und Materie

§ 761 Die wichtigsten Stichworte zur Wechselwirkung energiereicher geladener Teilchen mit Materie sind Energieverluste durch Anregung und Ionisation, beschrieben durch die Bethe-Bloch-Formel, Bremsstrahlung, der Cerenkov-Effekt und Kernwechselwirkungen. In diesem Abschnitt sollen die hier erwähnten Elementarprozesse vorgestellt werden und ihre Anwendung auf Detektoren diskutiert werden. Für Übersichten siehe z.B. [5, 6, 18, 130, 132, 234].

§ 762 Der wichtigste Prozess bei der Wechselwirkung eines energiereichen geladenen Teilchens mit Materie ist der Energieverlust durch Anregung und Ionisation. Beim Vorbeiflug eines geladenen Teilchens an einem Atom wird Energie an eines der Hüllenelektronen abgegeben. Dieses Elektron kann auf ein höheres Energieniveau angehoben werden (Anregung) oder das Atom verlassen (Ionisation). Der sich dabei ergebende Energieverlust des geladenen Teilchens ist durch die Bethe-Bloch Formel gegeben zu

$$-\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4}{m_e c^2} \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[\ln \left\{ \frac{E_{max} c^2}{\langle I \rangle} \right\} - \beta^2 - \frac{C_i}{Z} - \frac{\delta}{2} \right]. \quad (5.2)$$

Das Bremsvermögen hängt somit von den Materieparametern Kernladungszahl Z , Atomgewicht A und Dichte ρ , der mittleren Ionisationsenergie $\langle I \rangle$ und den Teilchenparametern Ladung z und Geschwindigkeit $\beta = v/c$ ab. Der zweite Term in der Klammer berücksichtigt die relativistischen Effekte, der dritte Term enthält Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung der geringeren Ionisationswahrscheinlichkeit der inneren Schalen bei niedriger Einfallenergie, der letzte Term gibt die Polarisation des Absorbers für hohe Teilchenenergien wieder [5, 132, 234].

⁴Die gleiche Einschränkung gilt natürlich auch für das Plasma, d.h. den thermischen Teil der Teilchenverteilung. Auch dieses lässt sich im wesentlichen nur in-situ untersuchen – lediglich die Elektronendichte lässt sich mit Hilfe von Radiowellen auch als remote sensing messen. Ebenso lassen sich Elektronen (zumindest wenn sie durch Materie oder Magnetfelder hinreichend abgelenkt werden) über die emittierte Röntgenstrahlung nachweisen. Plasmainstrumente werden wir im Rahmen dieses Skripts nicht näher diskutieren: obwohl die wie die Teilcheninstrumente im wesentlichen Elektronen und Protonen, das Plasma eben, messen, unterscheiden sie sich von diesen im Messprinzip: beim Nachweis energiereicher Teilchen wird die Wechselwirkung des einzelnen Teilchens mit dem Detektormaterial betrachtet. Damit lassen sich die einzelnen Teilchen identifizieren und charakterisieren. Bei der Untersuchung des Plasmas dagegen werden kollektive Effekte vieler Teilchen, z.B. Ladungsdichten, betrachtet. Letzteres ist u.a. durch die geringen Energiedichten der einzelnen Plasmateilchen gefordert.

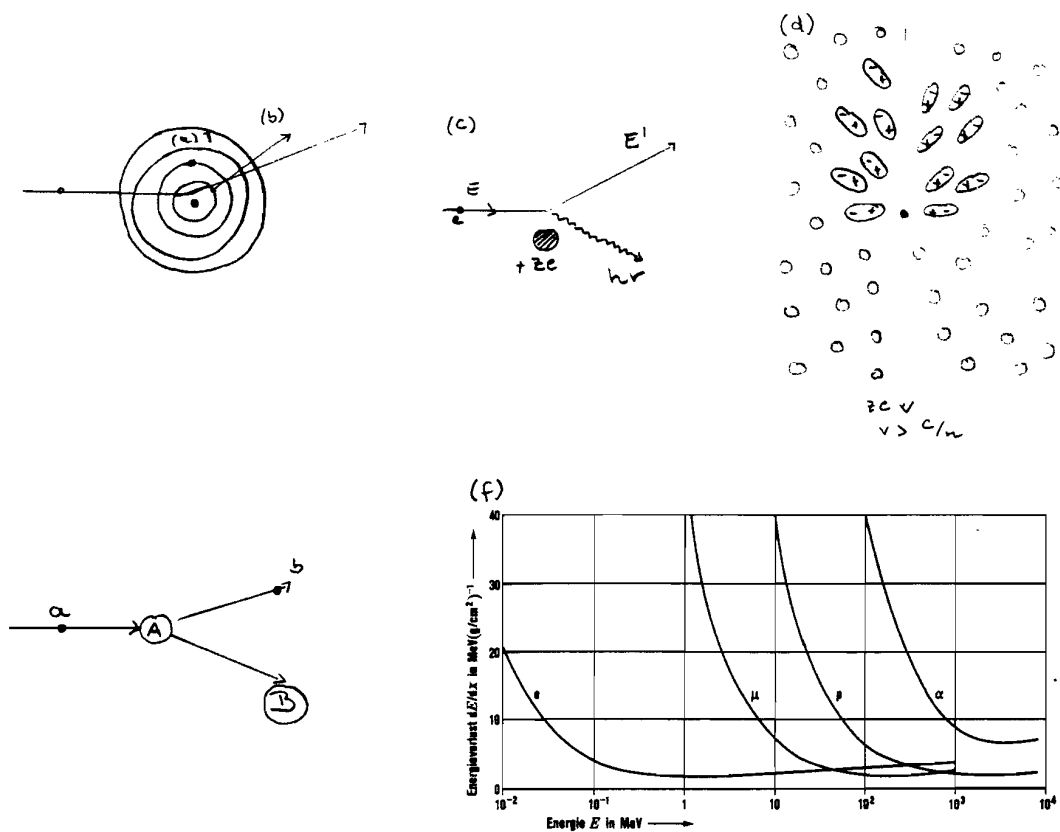


Abbildung 5.7: Wechselwirkung geladener Teilchen mit Materie: (a) Anregung, (b) Ionisation, (c) Bremsstrahlung, (d) Cerenkoeffekt, (e) Kernwechselwirkung und (f) Energieverlust-Beziehung in Abhängigkeit von der Energie der einfallenden Teilchen [5]

§ 763 Der Energieverlust hängt nicht von der Masse des Teilchens ab, d.h. die Energieverlustkurve ist für alle Teilchen einer Geschwindigkeit die gleiche. Der Verlauf der Energieverlustkurve ist in Abb. 5.7f in Abhängigkeit von der Energie für verschiedene Teilchen gegeben. Ist die kinetische Energie des Teilchens seiner Ruheenergie vergleichbar, so ist es minimalisierend. Für größere Energien nimmt der Energieverlust auf Grund relativistischer Effekte leicht zu. Mit abnehmender Energie dagegen steigt der Energieverlust an, da die für die Wechselwirkung mit einem Hüllenelektron zur Verfügung stehende Zeit auf Grund der abnehmenden Geschwindigkeit steigt.

§ 764 Aus der Bethe-Bloch-Formel ergibt sich auch eine Reichweite für das Teilchen in der Materie: das Teilchen rutscht dabei auf der Energieverlustkurve immer weiter nach links, bis es schließlich zur Ruhe kommt. Trägt man den Energieverlust gegen die zurück gelegte Strecke auf, so ist dieser kurz vor dem Reichweitenende maximal. In diesem Bragg-Peak zeigt sich ein fundamentaler Unterschied in der WeWi elektromagnetischer Strahlung und Teilchenstrahlung mit Materie: erstere wird exponentiell abgeschwächt, so dass die größte Ionisation am Anfang der Bahn erfolgt. Außerdem hat die elektromagnetische Strahlung im Prinzip eine unendliche Reichweite in Materie – lediglich die Intensität wird immer geringer. Teilchenstrahlung dagegen hat eine definierte Reichweite und gibt die maximale Dosis am Ende der Reichweite ab.⁵

⁵Diesen Unterschied macht man sich in der modernen Strahlentherapie zu nutze: verwendet man Teilchenstrahlung statt elektromagnetische Strahlung, so wird die Dosis genauer im Zielvolumen deponiert (definierte Reichweite, maximale Ionisation am Ende der Reichweite) und das Gewebe zwischen Eintrittsstelle des Strahls und Zielvolumen wird weniger geschädigt.

§ 765 Energieverlust durch Bremsstrahlung ist nur für Elektronen relevant. Ein einfallendes Elektron wird im Feld eines Kernes abgelenkt. Während dieser Beschleunigung strahlt es Energie ab. Die Winkeländerung des Elektrons kann dabei ebenso wie seine Energieabgabe sehr groß werden. Für hohe Energien wird der Energieverlust proportional der Energie des Elektrons.

§ 766 Cerenkov-Effekt: Während bei den bisher betrachteten Effekten das geladene Teilchen mit den individuellen Atomen der Materie wechselwirkt, wobei über die einzelnen Stöße aufsummiert wird, um den gesamten Energieverlust zu erhalten, handelt es sich beim Cerenkov-Effekt um einen kollektiven Effekt: bewegt sich ein geladenes Teilchen durch ein dielektrisches Medium mit einer Geschwindigkeit v , die größer ist als die Lichtgeschwindigkeit c/n in diesem Medium (n ist der Brechungsindex), so erleidet das Teilchen einen zusätzlichen Energieverlust dadurch, dass es das umgebende Medium polarisiert. Die Moleküle des umgebenden Mediums werden dadurch kurzzeitig zu Dipolen, die durch die zeitliche Veränderung dieses Dipols Strahlung emittieren. Der Öffnungswinkel θ des dabei entstehenden Lichtkegels hängt von der Teilchengeschwindigkeit ab:

$$\cos \theta = \frac{1}{\beta n},$$

d.h. je schneller ein Teilchen ist, umso schmaler wird der Öffnungskegel (vgl. Mach'scher Kegel). Der Energieverlust des Teilchens ist dabei nur gering, jedoch ist die Lichtemission wichtig für den Nachweis der Teilchen.

§ 767 Kernwechselwirkungen sind ein umfangreiches Gebiet, für die von uns betrachteten Energiebereiche und Detektoren spielen sie eine untergeordnete Rolle.⁶ Daher sei hier nur kurz das Reaktionsprinzip angegeben: Ein Teilchen a stößt auf einen Kern A . Das Ergebnis dieser Reaktion sind ein Teilchen b und ein Kern B sowie die Reaktionsenergie Q , die sich aus der Differenz der Restmassen zu $((m_a + m_A) - (m_b + m_B))c^2$ ergibt. Ist Q größer als Null, so ist die Reaktion exotherm, ist Q kleiner Null ist sie endotherm. Endotherme Reaktionen treten bei der Erzeugung neuer Teilchen auf, die dabei 'verschwindende' Energie muss den Reaktionspartnern in Form kinetischer Energie zur Verfügung stehen.

Detektortypen

§ 768 Nachdem wir die grundlegenden Wechselwirkungen von Teilchen mit Materie betrachtet haben, können wir uns nun den einzelnen Detektortypen zuwenden. Für den Nachweis von Elektronen im MeV-Bereich und von Nukleonen im Bereich von einigen MeV bis hin zu hunderten von MeV sind die wichtigsten verwendeten Detektoren Halbleiterdetektoren, Szintillationszähler und Cerenkov-Detektoren.

§ 769 Der Szintillationszähler beruht darauf, dass geladene Teilchen beim Auftreffen auf Kristalle Lumineszenzlicht erzeugen. Als Szintillatormaterial werden organische Einkristalle wie NaJ, organische Flüssigkeiten und organische Plastikmaterialien verwendet. Das entstehende Szintillationslicht wird von einem Photomultiplier in einen elektrischen Strom umgewandelt. Auf diese Weise ist der Nachweis von geladenen Teilchen und γ -Strahlung möglich. Letztere erzeugt im Szintillator Sekundärelektronen, die dann ihrerseits wieder Szintillationslicht erzeugen.

§ 770 Die häufigsten Detektoren sind Halbleiterdetektoren (siehe Abb. 5.8). Dazu werden ein p- und ein n-leitender Silizium-Kristall zu einem p-n-Übergang vereinigt. Zwischen diesen beiden Kristallen entsteht eine Verarmungszone (Raumladungszone). Fällt ein geladenes

⁶Sie spielen allerdings in der Atmosphäre bei der Erzeugung der kosmogenen Nuklide eine große Rolle: so werden ^{14}C und ^{10}Be durch Wechselwirkung zwischen dem Kern eines Stickstoffatoms und den Protonen der einfallenden kosmischen Strahlung erzeugt.

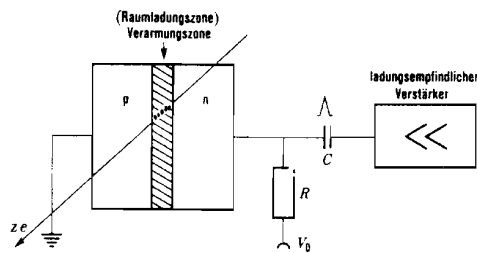


Abbildung 5.8: Prinzipieller Aufbau eines Halbleiterdetektors [5]

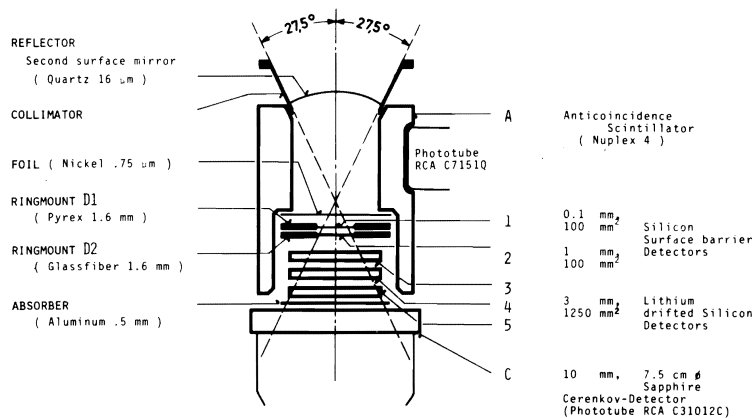


Abbildung 5.9: Aufbau des Helios-Teilchenteleskops E6 [140]

Teilchen in diese Raumladungszone, so werden Elektronen-Loch-Paare erzeugt. Die zur Erzeugung eines Elektronen-Loch-Paars benötigte Energie beträgt in Silizium 3.23 eV (Germanium 2.84 eV), so dass ein einfallendes Teilchen sehr viele Elektronen-Loch-Paare erzeugt. Durch das äußere Feld wandern Löcher und Elektronen in unterschiedliche Richtungen. Es entsteht ein Strom, der über einem Widerstand als Spannungsimpuls abgegriffen wird. Dieser ist proportional zur Restenergie dE des einfallenden Teilchens, falls dieses im Detektor stecken bleibt, oder proportional zu seinem Energieverlust dE/dx falls es den Detektor durchsetzt.

§ 771 Der Cerenkov-Detektor wird im wesentlichen nur zum Nachweis von Teilchen verwendet. Eine Bestimmung der Teilchenenergie aus der Schwellenwert-Geschwindigkeit und dem Emissionswinkel der Strahlung ist jedoch auch möglich. Der Cerenkov-Effekt funktioniert am besten für Materialien mit großem Brechungsindex n , z.B. Wasser, Glas, Plexiglas oder organische Verbindungen.

Das Helios-Teilchenteleskop

§ 772 Für die Messung energiereicher geladener Teilchen im Weltraum verwendet man keine Einzeldetektoren, sondern Kombinationen aus verschiedenen Detektoren. Ziel ist außer dem Teilchennachweis die Bestimmung von Teilchenparametern wie Masse, Ladung (Teilchensorte) und Energie. Abbildung 5.9 zeigt dazu den Aufbau des Helios-Teilchenteleskops [139]. Ziel dieses Instruments ist die Messung geladener energiereicher Teilchen der solaren und galaktischen kosmischen Strahlung. Untersucht werden Elektronen oberhalb 0.3 MeV und Nucleonen oberhalb 2 MeV/nucl (siehe auch Tab. 5.1).

§ 773 Der zentrale Teil des Instruments sind fünf Halbleiterdetektoren zunehmender Dicke. Mit ihnen kann der Energieverlust der einfallenden Teilchen gemessen werden. Über die Zahl der getroffenen Detektoren ist eine grobe Information über die Reichweite und damit die Energie des Teilchens möglich. Dieser Satz von Halbleiterdetektoren ist von einem Antikoinzidenz-Szintillator umgeben: Teilchen, die schräg von der Seite auf das Teleskop fallen, können z.B. den dritten und vierten Detektor treffen und dort sinnvolle Energieverluste

Tabelle 5.1:
Energiekanäle des
Helios-Teilchenteleskops
E6

Kurz- bezeichnung	Energie-Fenster HELIOS 1	(MeV/N) HELIOS 2	Geom. Fakt. HELIOS 1	(cm ² sr) HELIOS 2	Koinzidenz	Detektoren mit PHA	Anzahl/von Sektoren
P1	1.3 - 3.8	1.7 - 3.7	0.48	0.43	$\overline{12} \overline{A}$	-	8
P4	3.8 - 12.8	3.7 - 12.7	0.48	0.43	$12\overline{3} \overline{A}$	1,2	8
P13	12.8 - 26.8	12.7 - 27.4	0.48	0.43	$123\overline{4} \overline{A}$	1,1,3	8
P27	26.8 - 36.6	27.4 - 37.3	0.48	0.43	$1234\overline{5} \overline{A}$	2,3,4	8
P37	36.6 - 50.7	37.3 - 51.0	0.48	0.43	$1234\overline{5} \overline{C\overline{A}}$	3,4,5	1
P51	> 50.7	> 51.0	2.23	2.23	$34\overline{5} \overline{C\overline{A}}$	4,5,C	8
A2	1.7 - 3.7	2.0 - 3.6	0.48	0.43	$\overline{12} \overline{A}$	-	8
A4	3.7 - 12.7	3.6 - 12.6	0.48	0.43	$\overline{12\overline{3}} \overline{A}$	1,2	8
A13	12.7 - 26.6	12.6 - 27.2	0.48	0.43	$\overline{12\overline{34}} \overline{A}$	1,2,3	8
A27	26.6 - 36.5	27.2 - 37.2	0.48	0.43	$\overline{1234\overline{5}} \overline{A}$	2,3,4	1
A37	36.5 - 48.1	37.2 - 48.3	0.48	0.43	$\overline{234\overline{5}} \overline{C\overline{A}}$	3,4,5	1
A48	> 48.1	> 48.3	2.23	2.23	$34\overline{5} \overline{C\overline{A}}$	4,5,C	1
E0.3	\gtrsim 0.3	\gtrsim 0.3	0.49	0.46	$\overline{12\overline{3}} \overline{A}$	-	8
E0.8	\gtrsim 0.8	\gtrsim 0.8	0.49	0.46	$\overline{12\overline{34}} \overline{A}$	2,3	8
E2	\gtrsim 2.0	\gtrsim 2.0	0.49	0.46	$\overline{1234\overline{5}} \overline{A}$	2,3,4	1
E3	\gtrsim 3.0	\gtrsim 3.0	0.49	0.46	$\overline{1234\overline{5}} \overline{C\overline{A}}$	3,4,5*	1

*nur HELIOS 1

machen. Allerdings wäre diese Information verfälscht, da man aufgrund des fehlenden Signals der beiden oberen Detektoren davon ausgehen würde, dass die Teilchen dort nur einen geringen Energieverlust erlitten haben und die Teilchen falsch klassifizieren würde. Der Antikoinzidenz-Szintillator hat die Aufgabe, diese Irrläufer zu markieren: wenn gleichzeitig mit den Signalen in den Detektoren auch ein Signal der Antikoinzidenz vorliegt, wird das Teilchen als ungültig verworfen. Der untere Abschluss des Detektorsystems wird durch einen Cerenkov-Zähler gebildet: In ihm werden alle Teilchen mit hoher Energie, die die fünf darüberliegenden Detektoren durchsetzt haben, registriert. Wie beim Szintillator steht hier die Registrierung der Teilchen im Vordergrund. Allerdings ist in jedem Falle die Minimalenergie dieser Teilchen bekannt.

§ 774 Als physikalische Information erhalten wir damit von den fünf Halbleiterdetektoren jeweils die Restenergie dE (steckengebliebene) oder die Energieverluste dE/dx (durchgehende Teilchen) und vom Szintillator und Cerenkov-Detektor jeweils die Information über den Einfall eines Teilchens. Es gibt jetzt zwei Möglichkeiten, diese Information zu verwerten: (1) die Einteilung der Teilchen in Zählkanäle in Abhängigkeit von der Teilchensorte und -energie oder (2) die Pulshöhenanalyse, die eine genauere Beschreibung der einzelnen Teilchen erlaubt.

§ 775 Bei der Einteilung in Zählkanäle wird von den Detektoren nur die Information verwendet, ob sie angesprochen haben oder nicht. Betrachten wir dazu ein einfallendes Proton. Je nach Energie des Protons bleibt es gleich im ersten Detektor stecken oder fliegt weiter. Bleibt das Teilchen im ersten Detektor stecken, dann hat es eine Energie zwischen 1.7 MeV und 3.7 MeV: Bei geringerer Energie würde das Signal im ersten Detektor zu klein sein, um eine willkürlich gesetzte Schwelle zu überschreiten (s.u.), bei höherer Energie würde das Teilchen den Detektor durchsetzen und auch in Detektor 2 ein Signal erzeugen. Am Detektor 2 vorbei fliegen kann das Teilchen nicht, da die geometrische Anordnung so gewählt ist, dass Teilchen, die in den ersten aber nicht in den zweiten Detektor fallen können, automatisch in den Antikoinzidenzszintillator fallen und somit verworfen werden. Die Bedingung für dieses oben definierte Energieintervall ist also gegeben durch: Detektor 1 spricht an, Detektor 2 und alle folgenden sprechen ebenso wie die Antikoinzidenz A nicht an. Formal lässt sich das auch schreiben als $\overline{12\overline{A}}$ (siehe auch Tab. 5.1). Diese Bedingung, die das Teilchen in Abhängigkeit von den durchgesetzten Detektoren einem Zählkanal zuordnet, wird als Koinzidenzbedingung bezeichnet. Je nach der Zahl der durchgesetzten Detektoren ergeben sich dann die in Tab. 5.1 angegebenen Energieintervalle und Koinzidenzbedingungen.

§ 776 Was passiert nun, wenn die Teilchenpopulation nicht nur aus Protonen, sondern aus Elektronen, Protonen, Helium und, in geringer Menge, auch schwereren Kernen besteht? Für alle diese Teilchen können wir die Reichweite nach der Zahl der durchgesetzten Detektoren bestimmen, aber die Energieverluste dieser Teilchen in den einzelnen Detektoren sind aufgrund der unterschiedlichen Ladungszahlen verschieden, d.h. ein Heliumkern gibt bei gleicher

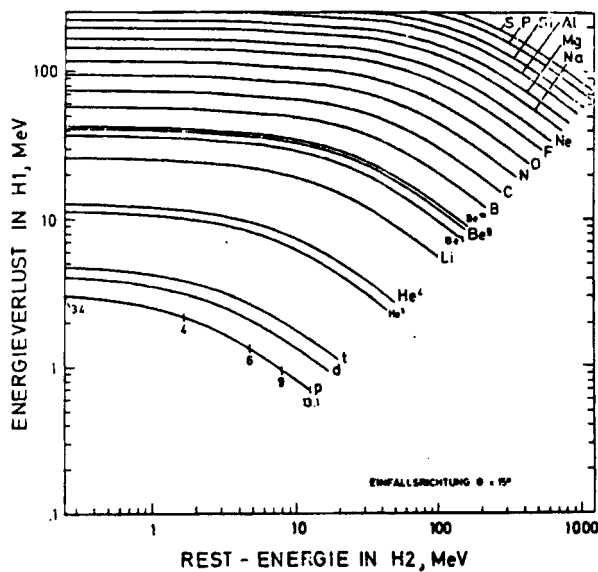


Abbildung 5.10: Pulshöhenmatrix: Mittlerer Energieverlust der Teilchen in Detektor 1 in Abhängigkeit von der Restenergie der Teilchen in Detektor 2 [246]

Geschwindigkeit wie ein Proton eine größere Energie ab. Darin liegt auch der Schlüssel zur Trennung der verschiedenen Teilchensorten. Die entscheidende Rolle hat dabei der erste Detektor. Der Detektor ist sehr dünn gewählt, so dass für eine vorgegebene Teilchensorte die Energieabgabe relativ definiert erfolgt. Elektronen geben nur wenig Energie ab (hohe Geschwindigkeit nahe c , minimalionisierende Teilchen), d.h. der Energieverlust eines Elektrons in Detektor 1 ist gering verglichen mit den Energieverlusten anderer Teilchen. Daher kann man in Detektor 1 eine Schwelle einführen: Teilchen, die weniger Energie abgeben, werden als Elektronen betrachtet, Teilchen, die mehr Energie abgeben, als Nukleonen. In diesem Beispiel liegt die Schwelle bei 180 keV. Um Protonen und Helium zu trennen, hat der erste Detektor eine zweite Schwelle: Helium gibt bei gleicher Geschwindigkeit (gleiche Energie/nucleon) mehr Energie ab als ein Proton (doppelte Ladung, geht quadratisch in die Bethe-Bloch-Formel (5.2) ein). Damit lässt sich eine zweite Schwelle bei 3.9 MeV einführen: Protonen mit höherer Energie würden den Detektor durchsetzen und in Detektor 2 ein Signal erzeugen, der maximale Energieverlust für Protonen liegt also unterhalb dieser Schwelle; Helium dagegen gibt mehr Energie ab und liegt oberhalb dieser Schwelle. Schwerere Kerne sind sehr selten, im Rahmen von Zählkanälen werden sie zusammen mit dem Helium gezählt. Sie können erst in der Impulshöhenanalyse identifiziert werden.

§ 777 Durch Vergleich der einzelnen Detektoren und dem Ansprechen der Schwellen in Detektor 1 lassen sich entsprechend der Koinzidenzbedingungen die in Tab. 5.1 gegebenen Zählkanäle definieren. Dabei bedeutet i jeweils, dass der Detektor i angesprochen hat, \bar{i} , dass er nicht angesprochen hat und \dot{i} , dass die obere Schwelle des Detektors angesprochen hat.

§ 778 Bisher haben wir, abgesehen von den Schwellen in Detektor 1, nur die Information ,ob ein Detektor angesprochen hat verwendet, nicht jedoch die Restenergien oder Energieverluste in den einzelnen Detektoren. Betrachten wir nur die beiden letzten Detektoren, die ein Teilchen getroffen hat, so erhalten wir eine Information über den Energieverlust im vorletzten und die Restenergie im letzten Detektor. Trägt man diese gegeneinander auf, so ergibt sich eine Linie, die als die Ortskurve in der Pulshöhenmatrix bezeichnet wird. Abbildung 5.10 zeigt diesen Zusammenhang für verschiedene Teilchensorten. Teilchen mit größerer Energie würden auch den zweiten Detektor durchdringen, der Energieverlust im zweiten Detektor nimmt dann wieder ab (größere Geschwindigkeit entspricht geringerer Ionisation), d.h. die Ortskurve in Abb. 5.10 würde für höhere Energien hin nach links unten abknicken.

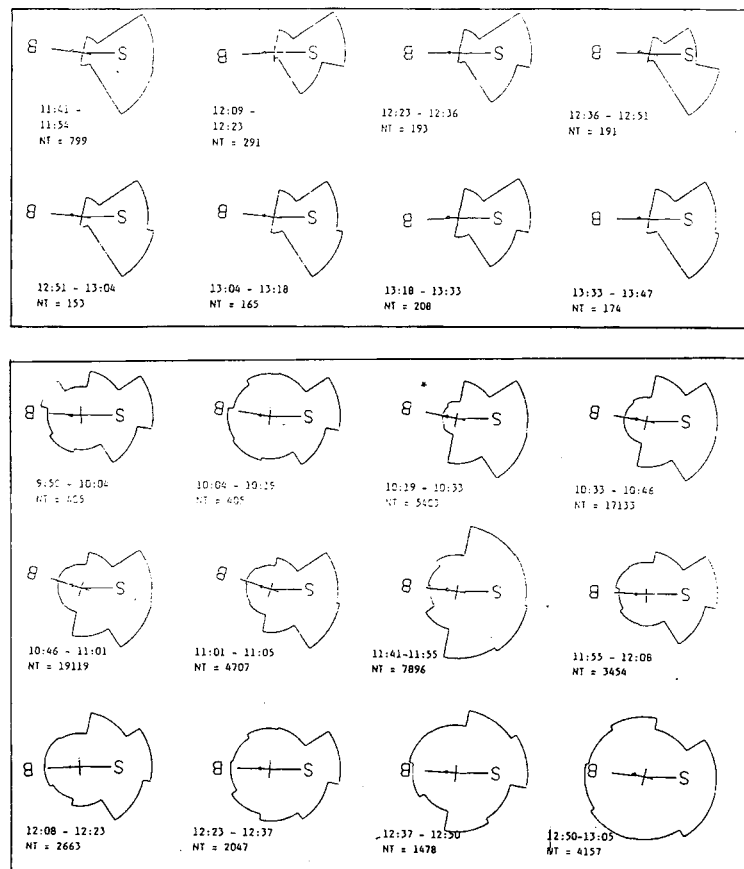


Abbildung 5.11:
Winkelverteilungen
(oben: gebündelte
Verteilungen, unten
Verteilung, die bei Ein-
satz des Ereignisses * im
wesentlichen auf einen
Halbraum beschränkt
ist und sich dann zu einer
isotropen Verteilung
aufweitet)

Abbildung 5.12: Intensitäts- und Anisotropie-Zeitprofile

§ 779 Mit Hilfe dieser Pulshöhenmatrizen ist auch eine Trennung von Isotopen (z.B. ^3He und ^4He) möglich. Aus Gründen der Datenkompression werden stets nur die Informationen der drei letzten Detektoren übertragen; das ist auch physikalisch sinnvoll, da ein Teilchen, das viele Detektoren durchsetzen konnte, in den oberen Detektoren sehr schnell (minimalionisierend) war und damit auch nur einen geringen Energieverlust gemacht hat (vgl. Abb. 5.7f).

§ 780 Durch die Spinstabilisierung des Satelliten rotiert dieser einmal pro Sekunde um seine Symmetrieachse. Da das Instrument senkrecht zu dieser Achse blickt, kann man Informationen über Vorzugsrichtungen des Teilcheneinfalls erhalten. Dazu werden die Zählerstände während einer Rotation des Raumfahrzeuges achtmal ausgelesen, so dass Intensitäten in acht Sektoren bestimmt werden. Zur Darstellung dieser räumlichen Abhängigkeit gibt es verschiedene Möglichkeiten: (1) Man kann die Intensitäts-Zeitverläufe aller acht Sektoren getrennt darstellen und dann versuchen, diese zu vergleichen (Nachteil: unübersichtlich), (2) man kann zu festen Zeiten die Intensitäten der einzelnen Sektoren in Form eines Histogramms darstellen (Winkelverteilung wie in Abb. 5.11 gezeigt, Nachteil: jedes Zeitintervall gibt ein Bild, bei langen Zeiträumen unübersichtlich), (3) Bildung einer abgeleiteten Größe Anisotropie, von der sich Zeitprofile erstellen lassen durch Fourierentwicklung der Winkelverteilung.

§ 781 Abbildung 5.12 zeigt eine Folge von 4 solaren Ereignissen. Im oberen Teil sind Intensitäts-Zeitprofile gezeigt. Die zugehörigen Flares sind durch Pfeile markiert. Der untere Teil zeigt die Anisotropie-Zeitprofile: Am Anfang eines Ereignisses ist die Anisotropie groß, d.h. die Teilchen fallen aus einem begrenzten Winkelbereich aus solarer Richtung in das Teleskop.

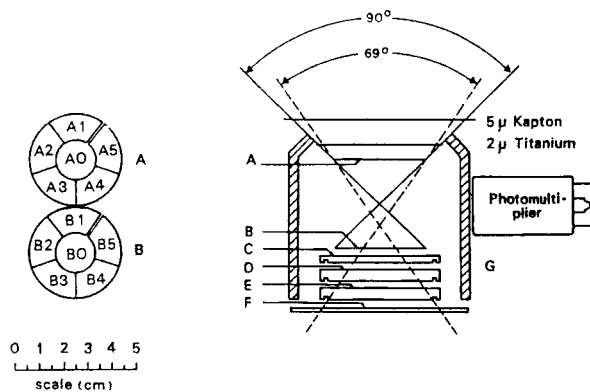


Abbildung 5.13: EPHIN Teilchenteleskop mit den sektorisierten Detektoren A und B [141]

Im Laufe der Zeit sinkt die Anisotropie ab, da die Verteilung breiter wird, wie im unteren Beispiel in Abb. 5.11 gezeigt ist. Dieses Absinken erklärt sich aus der Teilchenausbreitung im interplanetaren Raum: die Teilchen werden an Magnetfeldirregularitäten gestreut, so dass auch wieder Teilchen auf die Sonne zulaufen. Somit können wir mit Hilfe dieses Instruments nicht nur die auf der Sonne beschleunigten Teilchen nachweisen und damit etwas über die solare Aktivität und Beschleunigungsmechanismen lernen, sondern auch die Ausbreitungsbedingungen und die Struktur des interplanetaren Mediums untersuchen.

§ 782 Bei der Analyse der Helios-Daten haben sich einige kleine und größere instrumentelle Probleme aufgezeigt, die man durch Verwendung anderer Detektorkombinationen bzw. modernerer Techniken zu vermeiden versucht.

EPHIN auf SOHO

§ 783 Auf Helios hat es sich als schwierig erwiesen, ^3He und ^4He zu trennen, da die Ortskurven dieser beiden Isotope relativ eng beieinander liegen. Wenn die Teilchen nur exakt senkrecht in das Teleskop fallen, so sind ihre Wege in den einzelnen Detektoren und damit ihre Energieverluste genau gleich und es würden sich scharf begrenzte Ortskurven ähnlich denen in Abb. 5.10 ergeben. Fallen Teilchen auch schräg auf die Detektoren, so sind ihre Wege im Detektor länger und die Energieverluste entsprechend größer. Dadurch ergibt sich eine Verbreiterung der Ortskurve und die Trennung zwischen benachbarten Ortskurven wird schwierig. Dies ist besonders ungünstig, wenn kleine Verhältnisse bestimmt werden sollen (^3He tritt nur ungefähr 10^{-4} mal so selten auf wie ^4He , in einigen Flares kann allerdings der ^3He -Anteil dem des ^4He gleichkommen).

§ 784 Im Ephin-Teilchenteleskop (siehe Abb. 5.13) verwendet man das gleiche Messprinzip wie beim Helios-Sensor (Stapel von 6 Detektoren umgeben von einer Antikoinzidenz), jedoch sind hier die oberen Detektoren sektorisiert, wie der linke Teil von Abb. 5.13 zeigt. Jedes dieser Detektorsegmente wird wie ein eigenständiger Detektor behandelt, d.h. im Gegensatz zu Helios liegen für die oberen Detektoren neben den Energieverlusten auch noch die Einfallsorte vor. Da beide oberen Detektoren sektorisiert werden, kann man den Einfallswinkel eines Teilchens bestimmen. Abbildung 5.14 zeigt dazu, wie aus den unterschiedlichen Sektoren der beiden Detektoren Bereiche des Einfallswinkels definiert werden können. Innerhalb eines Einfallswinkelbereiches sind dann die effektiven Wege der Teilchen im Detektor vergleichbar, die Ortskurven in der Impulshöhenmatrix verschmieren nicht so stark und die Isotopentrennung ist genauer bzw. auch dann noch möglich, wenn das Verhältnis dieser Isotope weit von eins entfernt ist.

§ 785 Neben der genaueren Untersuchung der Isotope und der besseren Trennung der verschiedenen Teilchensorten erlaubt eine derartige Sektorisierung von Detektoren auch die Messung von Winkelverteilungen auf einem Raumfahrzeug, das auf Grund der auf die Sonne ausgerichteten optischen Instrumente 3-Achsen stabilisiert ist und daher nicht spinnt.

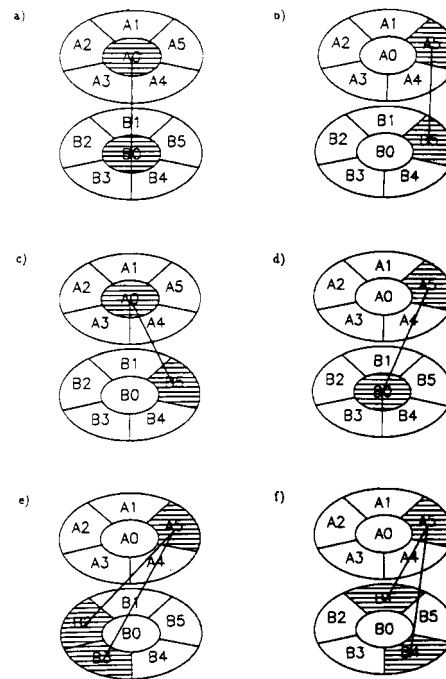


Abbildung 5.14: Einfallsrichtungen aus Sektorkombinationen [238]

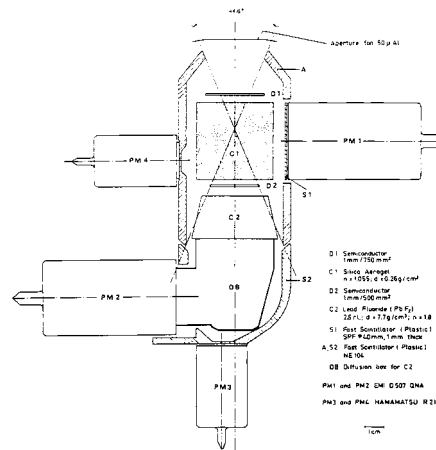


Abbildung 5.15: Schnitt durch den Sensor des Kieler Elektronen-Teleskops

KET auf Ulysses

§ 786 Ein weiteres von Helios bekanntes Problem ist die Trennung von Elektronen und Protonen durch die Schwelle in Detektor 1. Elektronen erleiden häufig Vielfachstreuungen, d.h. ihr Weg innerhalb des Detektors wird verlängert und ihr Energieverlust vergrößert. Dadurch werden einige Elektronen als Protonen gezählt. Außerdem hat das Helios-Teleskop nur Energien bis 51 MeV/nucl gemessen, schnellere (energiereichere) Teilchen wurden nur noch nachgewiesen, nicht aber analysiert. Das KET Instrument auf Ulysses misst weit über diesen Energiebereich hinaus und ist in der Lage, Elektronen und Protonen sauber zu trennen.

§ 787 Abbildung 5.15 zeigt den KET Sensor: Das Detektorsystem besteht aus einem Eingangsteleskop (gebildet durch die Halbleiterdetektoren D1, D2 und den Cerenkov-Zähler C1) sowie einem Kalorimeter C2, dem sich zur Erfassung durchgehender Teilchen ein Szintillationsdetektor S2 anschließt. Der Einfallswinkel des Sensors wird durch einen Antikoinzidenzszintillator S1 gebildet. Die Signale der Szintillatoren und Cerenkov-Detektoren werden durch Photomultiplier ausgewertet. Mit Hilfe von Schwellwertüberschreitungen im Cerenkov-

Lichtsignal, der Registrierung von Energieverlusten in der durchsetzten Materie und der quantitativen Analyse der Ausbildung elektromagnetischer Kaskaden im Kalorimeter sowie der Klassifizierung der Detektorsignale durch Diskriminatorschwellen und der Impulshöhenanalyse aller signalgenerierender Detektoren werden einfallende Teilchen identifiziert und ihre Energie erfasst.

§ 788 Beginnen wir mit dem Eingangsteleskop D1, D2 und C1. Hier fällt dem Cerenkov-Detektor die entscheidende Rolle bei der Trennung von Elektronen und Protonen zu: Elektronen haben bei gleicher Energie wie Protonen (oder andere Nukleonen) aufgrund ihrer geringeren Masse eine wesentlich höhere Geschwindigkeit. Daher erreichen sie bereits bei deutlich geringerer Energie die für die Erzeugung von Cerenkov-Strahlung kritische Geschwindigkeit. Die Unterscheidung zwischen Elektronen und Protonen erfolgt dann durch die Abfrage, ob der Cerenkov-Detektor ein Signal gegeben hat oder nicht. Protonen sind erst im GeV Bereich schnell genug, um ein Signal zu erzeugen, diese können aber durch unterschiedliche Signale in den folgenden Detektoren von den Elektronen unterschieden werden.

§ 789 In diesem Instrument werden Nukleonen bis zu Energien von ca. 1200 MeV/nukl erfasst, Elektronen bis zu Energien von ca. 10 MeV. Durch geeignete Wahl von Schwellen und die Verwendung von drei Detektoren ist dieser Energiebereich in Kanäle unterteilt. Teilchen mit höheren Energien durchsetzen dieses Teilchenteleskop und fallen in das aus dem Cerenkov-Detektor C2 und dem Szintillator S2 gebildete Kalorimeter. Der Begriff Kalorimeter soll darauf hindeuten, dass in diesem Detektor die Energie der einfallenden Elektronen bestimmt werden soll. Die einfallenden Elektronen bilden im C2 eine elektromagnetische Kaskade und hinterlassen über ihre Spurlängen und die Spurlängen der gebildeten sekundären Elektronen ein Cerenkov-Lichtsignal, das der Einfallsenergie äquivalent ist. Kann der sich ausbildende Schauer nicht im Material wieder vollständig absorbiert werden (mit steigender Energie), so muss der umgebende S2-Szintillator zusätzlich Auskunft über die Anzahl entweichender Sekundärelektronen geben, da deren Beitrag zum Gesamtlicht nun fehlt. Wie schon im C1 können Protonen hier nur dann ein Signal erzeugen, wenn ihre Energie ausreichend hoch ist.

5.1.3 Magnetosphäre und Ionospäre

§ 790 Die Struktur und Grundbegriffe zur Magnetosphäre sind bereits in Abschn. 3.1.2 beschrieben. Im Rahmen solar-Terrestrischer Beziehungen sind die folgenden Aspekte relevant:

- die Abschirmung der galaktischen kosmischen Strahlung durch das geomagnetische Feld;
- das Eindringen von Sonnenwind und solaren energiereichen Teilchen über den Polkappen und in flux transfer events,
- die Dynamik der Magnetosphäre im Zusammenhang mit Fluktuationen und Störungen im Sonnenwind,
- das damit verbundenen Eindringen magnetosphärischer Teilchen in die Atmosphäre.

§ 791 Untersuchungen der Magnetosphäre erfolge im wesentlichen mit in-situ Instrumenten. Gemessen werden elektromagnetische Felder, Plasmadichten und -temperaturen sowie energiereiche Teilchen. Lediglich einige Plasmawellen lassen sich mittels remote sensing nachweisen.

§ 792 Die Eigenschaften der Magnetosphäre und damit ihre Variabilität wird durch die Eigenschaften der angrenzenden Medien bestimmt: die äußere Magnetosphäre ist durch die Wechselwirkung mit dem Sonnenwind determiniert. Ihre Struktur ist daher in Lokalzeit bzw. im Bezug auf die Erde–Sonne-Achse annähernd fix und die Erde dreht sich drunter weg. Die untere Grenze der Magnetosphäre ist die Atmosphäre. Diese ist stark durch die Erdoberfläche bestimmt: die Verteilung von Land- und Wasserflächen, orographische Hindernisse und Reibung am Boden bestimmen die Bewegung der Atmosphäre. Die Wind- und Drucksysteme sind daher auf die geographische Position bezogen und rotieren mit der Erde mit.

Abbildung 5.16:
Geospace, das erdnahe Umfeld. Zwischen neutraler Atmosphäre und Magnetosphäre befindet sich die Ionosphäre, die gleichzeitig beide koppelt [435]

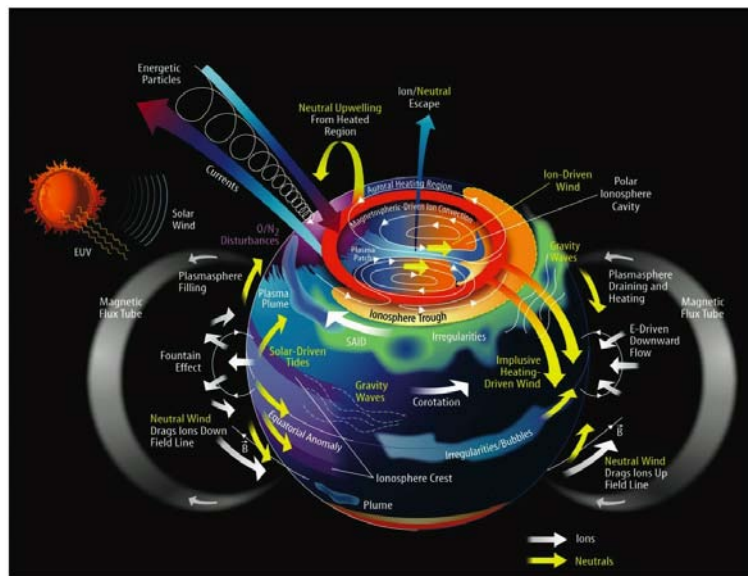
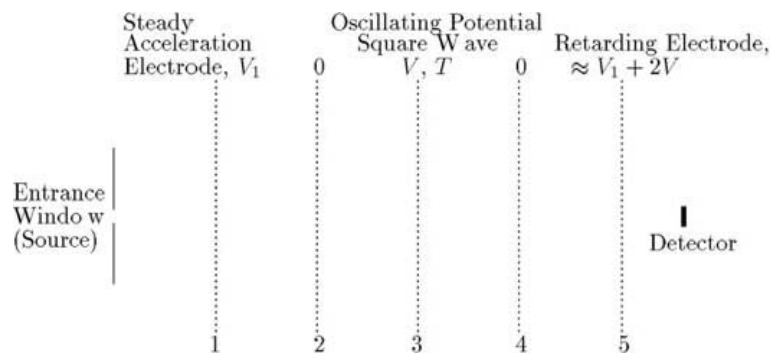


Abbildung 5.17: Time of Flight (TOF) Methode zur Messung energiereicher Teilchen [115]



§ 793 Die Kopplung zwischen fixem und korotierendem Erdumfeld erfolgt auf teilweise durch Reibung und teilweise durch elektrische und magnetische Felder. Eine wichtige Rolle kommt dabei der Ionosphäre zu: das planetare Magnetfeld reguliert die Bewegung der geladenen Teilchen. Die Bewegung von geladenen Teilchen erzeugt andererseits aber auch magnetische Felder, die sich dem planetaren Feld überlagern: ein Plasma ist ein magnetisiertes Gas, das mit sich selbst in Wechselwirkung tritt. Die Kenntnis der oberen Atmosphäre (und insbesondere der Ionosphäre) ist daher für das Verständnis der Magnetosphäre und ihrer Aktivität genau so wichtig wie umgekehrt die Berücksichtigung der Eigenschaften der Magnetosphäre beim Studium der oberen Atmosphäre.

§ 794 Untersuchungen der Ionosphäre erfolgen mit Raketen, da selbst niedrig fliegende (militärische) Satelliten nur die dünnen oberen Ionosphärenschichten messen können. In diesen Bereich ist die Messung der Plasmaeigenschaften relevant, in größeren Höhen gewinnt zunehmend die Messung des Magnetfeldes an Bedeutung.

Energereiche Teilchen

§ 795 Die energiereichen Teilchen lassen sich wie in Abschn. 5.1.2 beschrieben messen. Teilchen geringerer Energie werden häufig mit Time-of-Flight (TOF) Methoden nachgewiesen. Das Prinzip ist in Abb. 5.17 gegeben. Vor Erreichen des Detektors müssen die zu messenden Ionen eine Reihe von Gittern durchsetzen von denen einige auf einem vorgegebenen Potential liegen, die mittlere dagegen auf einem oszillierenden Potential. Das Potentialgefälle V_1 zwischen den Gittern 1 und 2 beschleunigt die Ionen um einen Geschwindigkeitszuwachs $\sqrt{2qV_1/m}$, der vom Massen-zu-Ladungsverhältnis m/q abhängt. Auf Grund der unterschiedli-

chen Anfangsgeschwindigkeiten haben die Ionen aber weiterhin unterschiedliche Geschwindigkeiten. Das oszillierende Potential an Gitter 3 beschleunigt nur Ionen mit Geschwindigkeiten nahe $2d/T$ mit d als dem Abstand zwischen den Gittern 2 und 3 und T als der Oszillationsperiode. Gitter 5 dient als verzögernde Elektrode: es hindert alle Ionen, die nicht die maximal mögliche Geschwindigkeit erreicht haben daran, auf den Detektor zu treffen. Damit wird der Ionenstrahl, der auf Gitter 2 trifft, entsprechend der Geschwindigkeit gefiltert, so dass nur Ionen mit einem bestimmten m/q den Detektor erreichen. TOF Spektrometer werden häufig mit elektrostatischen Deflektoren kombiniert. Ein neueres Beispiel ist CELIAS auf SOHO [58].

§ 796 Ein auch aus dem Labor bekanntes alternatives Nachweisverfahren für energiereiche Teilchen ist das Massenspektrometer: durch die Ablenkung einer Ladung im Magnetfeld lässt sich das Massen-zu-Ladungsverhältnis q/m bestimmen. Auf einem Satelliten hat das Massenspektrometer gegenüber dem Labor zwei Vorteile: es muss kein Vakuum erzeugt werden und die zu untersuchenden Teilchen sind ohnehin bereits ionisiert. Der erforderliche Magnet ist jedoch eine Einschränkung für die Verwendung auf Satelliten: zum einen auf Grund seiner Masse, zum anderen auf Grund des von ihm erzeugten Feldes – die Messung eines relativ schwachen Feldes wie des interplanetaren Magnetfeldes ist auf Grund des starken Störfeldes nicht möglich.

Plasma

§ 797 Die Messung des Plasmas erfolgt nicht über den Nachweis einzelner Ionen (oder Elektronen) sondern über kollektive Effekte. Das Standardinstrument zur Messung von Plasmaeigenschaften ist die Langmuir Sonde; der Nachweis der geladenen Teilchen erfolgt durch den mit ihnen verbundenen Strom. Durch das Anlegen verschiedener Potentiale lassen sich die Elektronendichte, die Energieverteilung der Elektronen und damit die Temperatur des Plasmas sowie die Ionendichte bestimmen.

§ 798 Ein indirektes Messverfahren sind die Impedanz- und die Resonanzsonde. Beide messen die elektrischen Eigenschaften des Mediums; Modelle über den Zusammenhang zwischen Plasmaeigenschaften und elektrischen Eigenschaften erlauben dann einen Rückschluss auf die ersteren. In der Impedanzsonde wird die Abhängigkeit der dielektrischen Konstante ε von der Elektronendichte ausgenutzt. Im Labor würde man die dielektrische Konstante eines Materials messen, in dem man das Material in einen Kondensator ein bringt und die Veränderung der Kapazität bestimmt. Im Weltraum macht man es genauso. Der Kondensator ist Bestandteil eines Schwingkreises; da die Kapazität von der Elektronendichte abhängt, hängt die Frequenz des Schwingkreises ebenfalls von der Elektronendichte ab. Messung der emittierten Radiofrequenz erlaubt also die Bestimmung der Elektronendichte. Auf Grund der Quasineutralität eines Plasmas ist dann auch die Ionendichte bekannt. Die Resonanzsonde dagegen besteht aus einem abstimmbaren Sender und einem Empfänger. Die Frequenz, bei der das Medium zwischen den beiden in Resonanz gerät, hängt von der Elektronendichte ab – letztere wird also indirekt aus der Resonanzfrequenz bestimmt.

Elektromagnetische Felder

§ 799 Die Messung elektromagnetischer Felder erfordert etwas Vorsicht, da auch das Raumfahrzeug selbst elektromagnetische Felder erzeugt. Daher sind die Instrumente in der Regel an bis zu wenigen 10 Meter langen Auslegern montiert. Letztere lassen sich technisch am einfachsten auf spinnenden Raumfahrzeugen realisieren: die Instrumente sind an einem Ende eines fest aufgewundenen Stahlkabels montiert. Im Orbit werden sie bei einem spinnenden Satelliten auf Grund der Zentrifugalkraft nach außen getragen – die Länge des Auslegers ist durch die Seillänge gegeben.⁷ Auf 3-Achsen stabilisierten Satelliten muss ein gefalteter Ausleger verwendet werden.

⁷Der schwedische Viking Satellit [603, 683] hat bereits in den 1980ern als Kleinsatellit 40 m lange radiale Ausleger für die Instrumente zur Messung des elektrischen Feldes gehabt.

§ 800 Zur Messung des elektromagnetischen Feldes werden zwei unterschiedliche Instrumententypen benötigt; einer zur Messung des magnetischen Feldes, ein anderer zur Messung des elektrischen. Beide Felder sind Vektorfelder, d.h. die Messinstrumente lassen sich in jeweils zwei Typen einteilen: die Messung des Feldvektors (Betrag und Richtung) oder die Messung der Feldstärke. Die Messung der ersteren erfordert in der Regel einen größeren Aufwand. Außerdem messen einige Instrumente nur die Fluktuationen des Feldes, andere dagegen den Absolutwert.

§ 801 Das einfachste Magnetometer ist das Pulsations-Magnetometer: drei Spulen werden, wie die Achsen des kartesischen Koordinatensystems, senkrecht zu einander angeordnet. Gemäß Faraday führt eine Änderung des magnetischen Flusses durch eine Fläche zu einem Strom in ihrer Umrandung. Durch die Messung dieses Stroms lassen sich die Änderungen des Feldes nachweisen – jede Spule ist dabei für eine Feldkomponente zuständig. So einfach das Messprinzip ist, es hat den entscheidenden Nachteil, dass nur Fluktuationen und keine Absolutwerte gemessen werden.⁸

§ 802 Das Fluxgate-Magnetometer basiert ebenfalls auf einer tri-axialen Konfiguration von Sensoren, kann aber zusätzlich zu den Fluktuationen auch die Komponenten eines konstanten Feldes messen. Jeder Sensor ist ein kleiner, um einen Kern mit hoher Permeabilität gewickelter Transformator. Die Primärspule wird mit einem hochfrequenten Strom angeregt, wobei Strom und Permeabilität so aufeinander abgestimmt sind, dass der Kern während jedes Halbzyklus der Anregung in die Sättigung getrieben wird. Die Sekundärspule weist dann eine zeitabhängige Spannung nach deren Beziehung zum Eingangssignal durch die Hysterese des Kerns gegeben ist. Für einen Kern hoher Permeabilität ist dieses Ausgangssignal stark verzerrt durch höhere Harmonische des Eingangs. Hat das externe Magnetfeld keine Komponente entlang der Achse des Transformators, so wird die Hystereseschleife symmetrisch durchlaufen und der Ausgang enthält nur ungradzahlige Harmonische. In Gegenwart eines mT Magnetfeldes dagegen wird die Sättigung in der einen Hälfte des Zyklus früher erreicht als in der anderen – im Ausgangssignal entstehen auch gradzahlige Harmonische. Das Verhältnis von Phasen und Amplituden dieser höheren Harmonischen erlaubt die Bestimmung der Feldkomponente parallel zur Achse des Transformators.

§ 803 Die Messung des elektrischen Feldes ist, zumindest theoretisch, einfach: mit Hilfe von zwei (oder mehr) Proben auf Auslegern lässt sich das Potential zwischen diesen messen. Auf einem Satelliten wird dieses Verfahren durch zwei Effekte beeinflusst: da sich der Satellit in einem Magnetfeld bewegt, ergibt sich ein $\vec{v} \times \vec{B}$ elektrisches Induktionsfeld. In der inneren Magnetosphäre kann dies bis zu 0.5 V/m annehmen. Für diesen Effekt kann leicht korrigiert werden, entweder mit Hilfe der Magnetfeldmessungen oder, natürlich nicht ganz so genau, unter Verwendung eines Referenzfeldes. Der zweite Effekt lässt sich kaum korrigieren und sollte bereits beim Instrumentdesign minimiert werden: die Sonden ebenso wie der Satellit wechselwirken mit dem umgebenden Plasma. Insbesondere baut sich eine Plasmaschicht um die Sonde auf, die das lokale elektrische Feld beeinflusst. Auch können bei einem vom Sonnenlicht beschienenen Sensor durch Photoionisation Elektronen ausgelöst werden, die ebenfalls das Feld beeinflussen. Die Summe dieser Ströme ergibt das floating potential, das durch einen Bias ausgeglichen werden muss.

§ 804 Eine von diesen Störungen nicht beeinflusste Messmethode basiert auf der Ablenkung von Elektronen in gekreuzten elektrischen und magnetischen Feldern. Das System besteht, wie in Abb. 5.18 angedeutet, aus einer Elektronenkanone, die Elektronen mit wohl definierter Energie erzeugt, einem System von Spulen zur Erzeugung eines magnetischen Feldes senkrecht zum Elektronenstrahl sowie einem Detektor mit hoher Ortsauflösung. In Abwesenheit eines externen elektrischen Feldes würden die Elektronen genau ein Gyrationorbit vollführen und an ihrer Quelle auf den Detektor treffen. In Gegenwart eines elektrischen Feldes ergibt

⁸Diese Aussage gilt für einen stabilisierten Satelliten. Auf einem spinnenden Satelliten führt auch ein konstantes Feld zu einer Änderung des magnetischen Flusses in jeder Spule und kann damit gemessen werden.

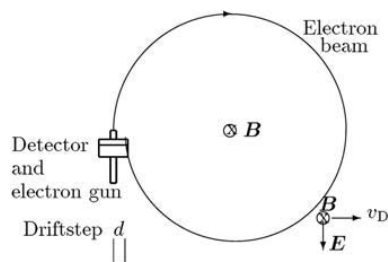


Abbildung 5.18: Messung des elektrischen Feldes aus der Drift von Elektronen [115]

sich kein geschlossenes Orbit sondern ein Versatz auf Grund der $\vec{E} \times \vec{B}$ -Drift. Das Elektron wird also in einigem Abstand von seinem nominellen Auftreffpunkt nachgewiesen - aus dem Abstand lässt sich das elektrische Feld berechnen.

5.2 Die Sonne

§ 805 Die Erforschung der Sonne ist ein Musterbeispiel für remote sensing: 150 Mio km von der Erde entfernt und mit einer 1 Mio K heißen Atmosphäre umgeben, ist die Sonne nicht das Objekt, an dem sich leicht in-situ Messungen vornehmen machen. Außerdem ist der interessanteste Aspekt der Sonne die von ihr emittierte elektromagnetische Strahlung – remote sensing drängt sich von selbst auf.

§ 806 Bereits lange vor dem Satellitenzeitalter hat man remote sensing an der Sonne vom Erdboden aus betrieben. Das Spektrum der Sonne wurde von u.a. Fraunhofer ausführlich analysiert und lieferte Hinweise auf die Existenz einer solaren Atmosphäre sowie deren Zusammensetzung; außerdem gaben die Linien erste Hinweise auf hohe Ionisationszustände und damit hohe Temperaturen in der Korona. Das solare Magnetfeld wurde mit Hilfe des Zeeman-Effekts (Aufspaltung von Spektrallinien im Magnetfeld) recht genau vermessen, so dass man bereits früh die Sonne als magnetischen Stern erkannte und die Bedeutung des Magnetfelds für den Solarzyklus und die solare Aktivität verstanden wurde.

§ 807 Auch solare Aktivität wurde früh beobachtet. Flares, ein Aufleuchten eines Sonnenflecks in verschiedenen Spektralbereichen, manchmal sogar im gesamten sichtbaren Bereich, wurden ebenso beschrieben wie Filamente und Protuberanzen, siehe Abb. 5.19. Auch die Veränderungen dieses Phänomene im Rahmen der solaren Aktivität wurden beschrieben. Allerdings waren alle Informationen auf die Bereiche des elektromagnetischen Spektrums beschränkt, die nicht in der Atmosphäre absorbiert wurden.

§ 808 Remote sensing der Sonne vom Satelliten aus liefert zusätzliche Informationen:

- Optische Instrumente, insbesondere Teleskope, arbeiten außerhalb der Erdatmosphäre präziser, da die Luftbewegung keine Schwankungen mehr erzeugen kann. Dies ist wichtig z.B. im Bereich der Helioseismologie.
- Beobachtungen sind auch außerhalb des sichtbaren Bereiches möglich, die sonst von der Atmosphäre absorbiert werden. Diese Bereiche sind im Laufe des Solarzyklus wesentlich variabler als der sichtbare Bereich.
- Die energiereichsten Prozesse auf der Sonne manifestieren sich durch Wechselwirkung von beschleunigten Teilchen mit solarer Materie im Röntgen- und Gammabereich, beides Wellenlängenbereiche, die von der Atmosphäre absorbiert werden.
- Messungen der Solarkonstante sind nur außerhalb der Atmosphäre möglich.

5.2.1 Die Instrumente

§ 809 Vom Satelliten aus wird die Sonne in verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums betrachtet. Die verschiedenen Generationen von Instrumenten haben sich

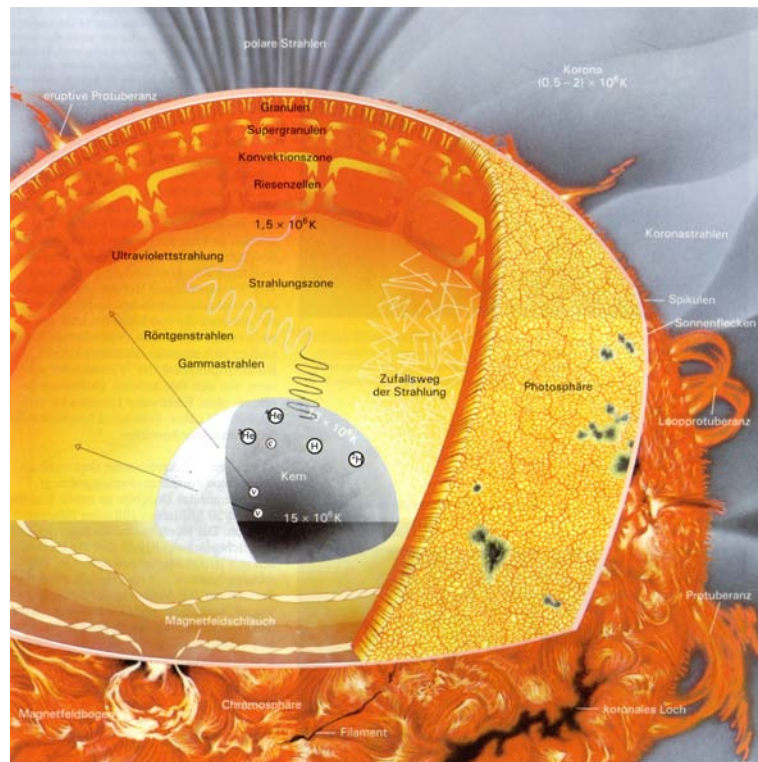


Abbildung 5.19: Einige Phänomene der aktiven Sonne [64]

ähnlich denen in der Erdfernerkundung entwickelt – nicht verwunderlich, da die Techniken recht ähnlich sind. Wie bei den Instrumenten in Kap. 3 werden wir hier zuerst die älteren Instrumente kennen lernen, da das Messprinzip klarer zu Tage tritt und das Instrument damit einfacher zu verstehen ist.

§ 810 Als Beispiele für Instrumente, die harte elektromagnetische Strahlung messen, seien hier einige Instrumente der bereits von der Satellitenabbildung in Abschn. 2.3.2 bekannte Solar Maximum Mission SMM (SolarMax [19, 493, 442, 490]) vorgestellt. SolarMax hat die Sonne in verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums untersucht. Die Instrumente messen Gammaemission, harte und weiche Röntgenstrahlung sowie solare UV-Emissionen. Zusätzlich trägt SolarMax einen Koronagraphen zur Beobachtung der äußeren Sonnenatmosphäre und ein Instrumentenpaket zur Messung der Solarkonstanten. Der Satellit wurde zur Zeit eines solaren Maximums gestartet, die wissenschaftlichen Fragestellungen betrafen den Energieoutput der Sonne und die Energieumsetzungen während verschiedener Phasen solarer Flares. Durch Reibung in der Hochatmosphäre wurde SolarMax soweit abgebremst, dass er im Dezember 1989 abstürzte (siehe § 128).

Hard X-Ray Burst Spectrometer HXRBS

§ 811 Abbildung 5.20 zeigt den Aufbau des Hard X-Ray Burst Spectrometers HXRBS [181]. Hauptbestandteil sind zwei Szintillatorkristalle, ein scheibenförmiger CsJ(Na) Kristall als der eigentliche Detektor und ein becherförmiger CsJ(Na) Kristall, der diesen als aktive Antikoinzidenz umhüllt. Ziel der Antikoinzidenz ist die Definition eines Öffnungswinkels: es sollen nur Photonen betrachtet werden, die aus einem bestimmten Winkelbereich direkt auf den Detektor fallen. Die Antikoinzidenz wird als aktiv bezeichnet, weil sie zwar nicht das Durchdringen eines Photons verhindert, dieses aber anzeigt und somit für jedes Signal des eigentlichen Detektors geprüft werden kann, ob ein gleichzeitiges Signal der Antikoinzidenz vorliegt oder nicht. Spricht auch die Antikoinzidenz an, so kam das Photon aus einem Bereich außerhalb des Öffnungswinkels und wird als ungültig verworfen. Das Instrument ist so ausgerichtet, dass der zentrale Detektor in solare Richtung blickt. Die Signale der Szintillationszähler werden

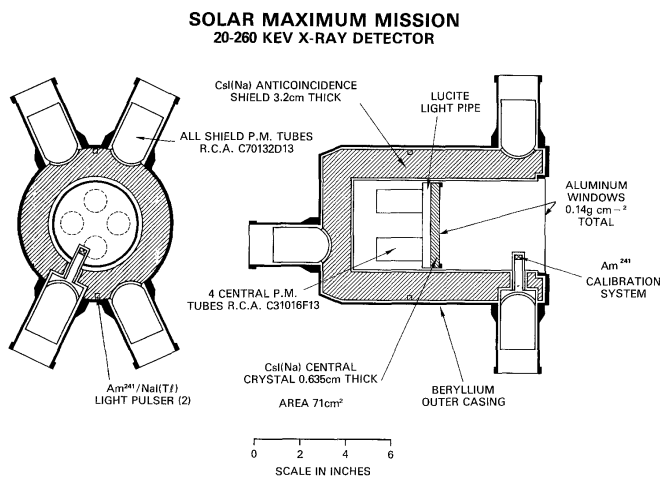


Abbildung 5.20: Aufbau des Hard X-Ray Burst Spectrometers [181]

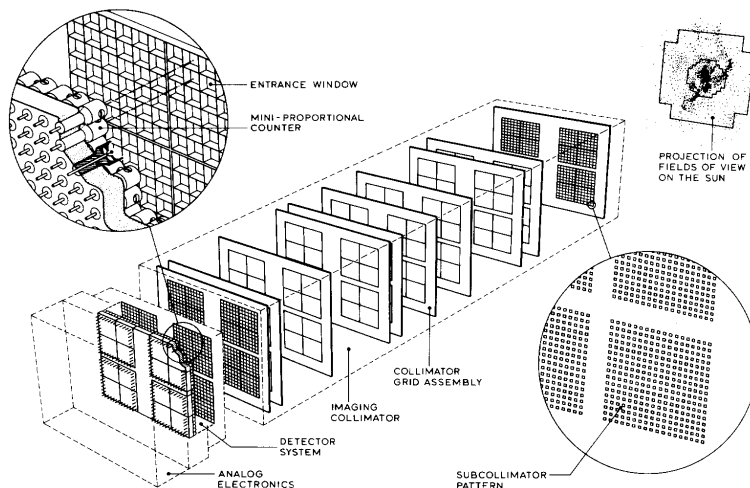


Abbildung 5.21: Hard X-ray Imaging Spectrometer HXIS [242]

von Photomultipliern in elektrische Impulse umgewandelt. Um Veränderungen im Ansprechvermögen des Detektors feststellen zu können, ist das Instrument mit einer ^{241}Am -Quelle ausgestattet, die Kalibrationen während des Fluges ermöglicht.

§ 812 Der Gesamtenergiebereich reicht von 20 keV bis 260 keV, die zeitliche Auflösung beträgt 128 ms. Durch die Einteilung des Meßbereichs in 15 Kanäle kann ein Spektrum der harten Röntgenstrahlung erzeugt werden. Zusätzlich gibt es einen Kanal zur Untersuchung schneller Veränderungen im solaren Output, der den gesamten Energiebereich mit einer Zeitaufösung von einigen Millisekunden umfasst.

Hard X-Ray Imaging Spectrometer HXIS

§ 813 Hat das Hard X-Ray Burst Spektrometer stets die gesamte Sonne im Blickfeld gehabt, will man beim Hard X-Ray Imaging Spectrometer HXIS [242] ein Abbild der Sonne im Röntgenlicht erzeugen, um Bereiche starker Röntgenemission identifizieren und mit in anderen Frequenzbereichen zu beobachtenden Strukturen in Beziehung setzen zu können. Die Sonne ist von der Erde aus gesehen eine Scheibe mit einem Durchmesser von $23'17''$ (Durchmesser von 1.4 Mio. km, Abstand von 150 Mio. km). Diese relativ kleine Scheibe wird vom HXIS im Röntgenbereich vermessen. Der Energiebereich von 3.5 – 30 keV ist dazu in 6 Kanäle eingeteilt. Die räumliche Auflösung beträgt $8''$ bei einem Blickfeld von $2'40''$ oder $32''$ bei einem Blickfeld von $6'24''$. Die zeitliche Auflösung variiert zwischen 0.5 und 7 sec, je nachdem in welchem Modus sich das Instrument befindet. Die räumliche Auflösung ist so gut,

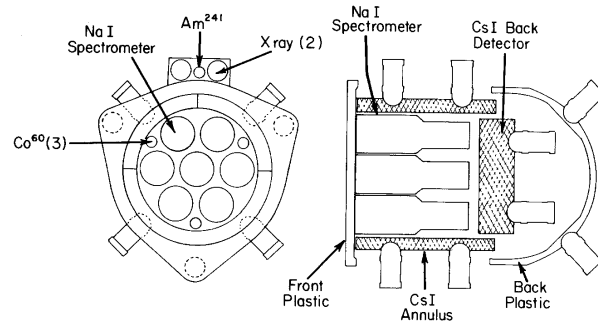


Abbildung 5.22: Gamma-Ray Spectrometer GRS [62]

dass größere aktive Gebiete (Durchmesser 100") in bis zu 12 Pixel zerlegt werden können. Die Röntgenemission kann also nicht nur einem aktiven Gebiet, sondern feineren Strukturen innerhalb eines Gebiets zugeordnet werden. Der Nachteil der hohen Auflösung ist der kleine Blickwinkel, d.h. das Instrument hat stets nur einen Teil der Sonne im Blickfeld.

§ 814 Um eine räumliche Auflösung zu erreichen, benötigt man ein ortsauflösendes System. Abbildung 5.21 zeigt dazu den Aufbau des HXIS. Die entscheidenden Teile sind der Kollimator und das ortsauflösende Detektorsystem. Im rechten oberen Teil der Abbildung ist eine 'Beispielaufnahme' eines aktiven Gebiets auf der Sonne angedeutet. Der Kollimator besteht aus einem zweidimensionalen Array von Subkollimatoren, die jeweils in 576 Sektionen unterteilt sind. Zehn derartige Kollimatorplatten befinden sich hintereinander. Durch Verwendung bestimmter Kombinationen von Subkollimatorgruppen lassen sich die unterschiedlichen Gesichtsfelder erzeugen [242]. Diese Kollimatorplatten sind 62 μm dick, die quadratischen Löcher haben Kantenlängen von 46 μm auf den äußeren Platten und Kantenlängen von 64 μm auf den mittleren Platten. Das Detektorsystem wird aus Mini-Proportionalzählern mit Durchmessern von 0.65 mm gebildet (siehe Abb. 5.21 links oben). Da nur Photonen, die sich in dem vorhergehenden Gitter parallel zur Teleskop-Achse bewegt haben, auf diese Detektoren fallen, ist eine gute Ortsauflösung gewährleistet.

§ 815 Die Proportionalzähler basieren auf folgendem Prinzip: Ein Photon fällt in eine gasgefüllte zylinderförmige Kammer, hier gefüllt mit einem Gemisch aus 95% Xe und 5% CO_2 unter einem Druck von 1.05 atm. Dabei löst das Photon entlang seiner Bahn Sekundärelektronen aus. Die zylinderförmige Kammer bildet die Kathode, in ihrer Mitte befindet sich ein dünner Draht (Anode). Aufgrund der Geometrie können schon geringe äußere Spannungen in der Nähe der Anode große Feldstärken bewirken. Die vom Photon erzeugten Elektronen werden auf die Anode beschleunigt und erzeugen dabei ein Signal, das der Ionisation durch das Photon proportional ist. Damit kann nicht nur ein Photondurchgang nachgewiesen werden, was ja für die Ortsauflösung schon ausreichend wäre, sondern es kann auch echte Spektroskopie betrieben werden, da eine Information über die Photonenenergie vorliegt.

Gamma-Ray Spectrometer GRS

§ 816 Das Gammainstrument GRS [62] ist ein Spektrometer ohne Ortsauflösung, jedoch mit sehr guter spektraler Auflösung. Messziel ist die Aufnahme eines Gammaskpektrums im Energiebereich von 0.3 – 9. MeV in 476 Kanälen. Die Zeitauflösung beträgt 16.4 sec. Die hohe spektrale Auflösung erlaubt die Identifizierung von charakteristischen Linien im Gammaskpektrum und damit Rückschlüsse auf die Teilchenbeschleunigung und die Wechselwirkungen dieser Teilchen mit der solaren Atmosphäre.

§ 817 Das in Abb. 5.22 gezeigte Gammaskpektrometer besteht aus sieben NaJ(Tl) Szintillatoren. Diese Szintillatoren sind elektronisch gekoppelt, so dass sie insgesamt nur ein Ausgangssignal erzeugen: sprechen mehrere Szintillatoren an, z.B. aufgrund eines schräg durchgehenden Photons, so werden die Signale aufsummiert, um die Gesamtenergieabgabe zu erhalten. Zur Kalibration während des Fluges verfügt das Instrument über drei ^{60}Co Quellen, über die

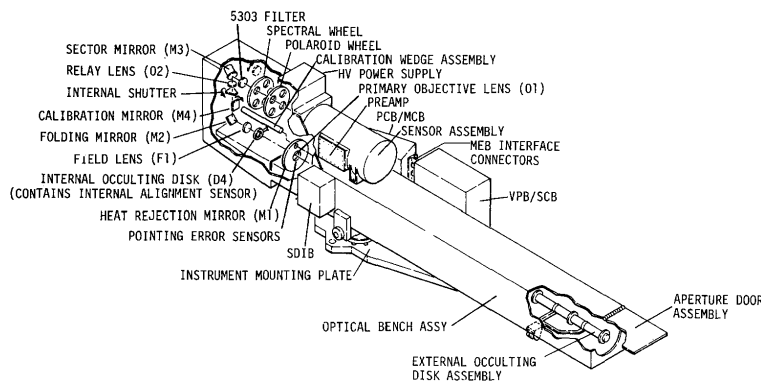


Abbildung 5.23: Der HAO Koronograph/Polarimeter auf SMM [159]

auch die einzelnen Szintillatoren gegeneinander kalibriert werden können. Das Spektrometer wird durch eine aktive Antikoinzidenz aus CsJ(Na) gegen seitlich einfallende Photonen abgeschirmt. Der dicke CsJ(Na) Kristall hinter dem Spektrometer dient der Registrierung hochenergetischer Gammaquanten mit Energien zwischen 10 und 100 MeV und gleichzeitig als Antikoinzidenz für rückwärts einfallende Photonen. Der Plastikfilter auf der Front des Instruments dient zur Abschirmung der einfallenden harten Röntgenstrahlung, da diese im eigentlichen Spektrometer durch Pile-up Effekte (Photonen treffen zeitlich so dicht zusammen ein, dass ihre Signale aufsummiert und als ein Teilchen mit größerer Energieabgabe gezählt werden) falsche Gammas vorspiegeln könnte.

Der Koronograph

§ 818 Ein gerade in der öffentlichen Darstellung gerne verwendetes Instrument ist der Koronograph – ein Teleskop, in dem eine Blende den direkten Blick auf die Sonne verwehrt und die Korona dargestellt wird. Mit Hilfe eines Koronographen wird letztendlich nur eine künstliche Sonnenfinsternis erzeugt. Ein Koronograph kann nur vernünftig vom Raumfahrzeug oberhalb der Atmosphäre beobachten: ein einfaches Abdecken der Sonnenscheibe bei einer Beobachtung vom Erdboden aus auf Grund des Streulichts in der Atmosphäre nicht ausreichend.

§ 819 Ein Koronograph ist technisch nur ein gewöhnliches Teleskop, d.h. die zur Beobachtung im sichtbaren Bereich diskutierten Instrumente aus Abschn. 3.2 könnten im Prinzip alle verwendet werden. In der Regel wird eine Konfiguration ähnlich der in Abb. 5.23 für den HAO-Koronographen auf SMM gezeigten verwendet:

- die räumliche Auflösung erfolgt durch Abbildung auf ein 2D CCD-Array. Scanner sind nicht attraktiv: aus technischen Gründen, da sich keine natürliche Scanrichtung ergibt (bei der Erdfernerkundung gibt die Satellitenbewegung bereits eine Scanrichtung vor). Aus physikalischen Gründen, da die Korona während einer CME schnell veränderlich ist und mit einem Scanner keine Momentaufnahme erzeugt werden kann.
- Spektrale Informationen werden durch Filter erzeugt: am einfachsten ist ein Rad mit Filtern in verschiedenen Bereichen (bzw. ohne Filter zur Abdeckung des gesamten Empfindlichkeitsbereichs des Sensors). Da die Quelle sehr hell ist, können die Filter für sehr schmale Wellenlängenbereiche empfindlich sein – für Filter über weitere Frequenzbereiche wird zusätzlich ein neutrales Graufilter benötigt.
- Informationen bezüglich der Polarisation werden entsprechend mit einem Filterrad gewonnen.

Zur in-flight Kalibration (und damit zur Detektion etwaiger Alterungseffekte) wird ferner eine Referenzlichtquelle mitgeführt, die von Zeit zu Zeit mit dem Koronographen (nur CCD oder CCD-Filter Kombinationen) betrachtet wird.

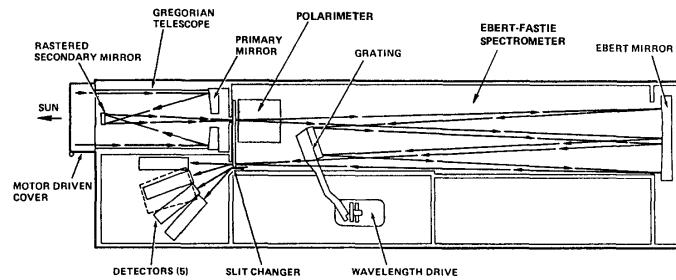


Abbildung 5.24: Ultraviolett Spectrometer and Polarimeter (UVSP) auf SMM [256]

§ 820 Die eigentliche technische Herausforderung liegt im Design des Strahlengangs und insbesondere der Blenden: die die Sonne abdunkelnde Scheibe sollte idealerweise das Licht der Photosphäre komplett ausblenden und gleichzeitig so wenig wie möglich von der unteren Korona abdecken. Neben einem genauen Design des Lichtweges setzt gerade letzteres eine sehr genaue Ausrichtung des Instruments auf die Sonne voraus (auf einem bewegten Instrumententräger!). Auch störende Reflektionen im Strahlengang müssen vermieden werden.

Messungen im (Extremen) Ultraviolett

§ 821 Auch die Messung der solaren Strahlung im Ultravioletten (bzw. bei noch kürzeren Wellenlängen) ist nur außerhalb der Atmosphäre möglich (vgl. Abb. 3.3). Eines der frühen ausgereiften Beispiele ist das Ultraviolett Spectrometer and Polarimeter (UVSP) auf SMM [256], siehe auch Abb. 5.24.

§ 822 Das UVSP ist ein bildgebendes Teleskop mit einer Brennweite von 1.8 m. Es unterscheidet sich von einem konventionellen Teleskop zur Erdfernerkundung nur durch den Empfindlichkeitsbereich der Detektoren: dieser liegt im UV und damit bei kürzeren Wellenlängen als die im Sichtbaren arbeitenden. Da die Photonen entsprechend höhere Energie haben, ist ihr Nachweis wesentlich unproblematischer als der im roten oder gar infraroten Bereich. Wie bei allen langbrennweitigen Teleskopen ist das Objektiv zur Verkürzung der Baulänge als Spiegelobjektiv realisiert. Spektroskopie erfolgt durch Zerlegung des einfallenden Lichtstrahls mit Hilfe eines Gitters. Gemessen wird bei einzelnen Spektrallinien, bestimmt werden deren Intensitäten, Profile, Verschiebungen und Verhältnisse. Auf diese Weise lassen sich verschiedene Plasmaparameter, u.a. Temperatur, Dichte, Geschwindigkeit und magnetische Flussdichte bestimmen.

Verständnisfrage 35 Wie war das nochmal mit der magnetischen Flussdichte und den Spektrallinien? Erläutern Sie – Sie sollten zumindest noch soweit kommen, dass Sie nur mit Hilfe eines einzelnen Stichworts googeln müssen.

5.2.2 Die Missionen

§ 823 Die ersten großen Missionen zur Erforschung der Sonne waren SkyLab [482] und Solar Maximum Mission SMM (SolarMax [493, 442, 490]). Die neuen Missionen sind das Solar and Heliospheric Observatory SOHO [357, 613] und Stereo [500]. Während SkyLab noch als zumindest zeitweise bemanntes Observatorium entwickelt war, sind die anderen drei Missionen unbemannt mit, ihrer Zeit entsprechend, sehr unterschiedlichen Zielsetzungen und Bahnen.

- Solar Maximum Mission SMM flog in der typischen ca. 500 km Bahn um die Erde: praktisch im Hinblick auf das Aussetzen vom Shuttle und Wartung aber auch unpraktisch, da SMM die Hälfte seines Orbits im Erdschatten war. Der wissenschaftliche Schwerpunkt war die Untersuchung der harten elektromagnetischen Strahlung (Röntgen- und Gammastrahlung) zum besseren Verständnis der Beschleunigungsvorgänge auf der Sonne. Nebenbei stellte man während der SMM Mission auch fest, dass die koronalen Massenausstöße (CMEs) an der Teilchenbeschleunigung beteiligt sind.

- der Schwerpunkt der SOHO Mission lag daher auf der Beobachtung koronaler Massenausstöße und Beobachtungen der unteren Sonnenatmosphäre im UV und EUV. Um die Beobachtungszeit zu verlängern, wurde SOHO nicht als Satellit sondern als im Lagrange Punkt verankerte Sonde konzipiert (vgl. Abschn. 2.7.1). Der sehr empfindliche Koronograph hat u.a. gezeigt, dass CMEs ein sehr häufiges Phänomen sind und das die in Richtung Erde startenden CMEs ein wichtiger Bestandteile Solar–Terrestrischer Beziehungen sind.
- Gerade letztere CMEs sind jedoch aus dem Erdorbit oder vom Lagrangepunkt aus schlecht zu untersuchen, da ein Koronograph am meisten Information über die CMEs liefern, die zum Rand der Sonne weglafen: ein Koronograph sieht immer nur die Projektion der CME auf eine Ebene senkrecht zur Achse Koronograph–Sonne. Die Stereo-Mission liefert hier Abhilfe: durch Beobachtung von zwei nicht in Erdnähe befindlichen Sonden lassen sich nicht nur in Richtung Erde laufende CMEs beobachten sondern es lässt sich auch aus den beiden Projektionen auf unterschiedliche Ebenen eine bessere Annäherung an die 3D Struktur der CME machen. Mit einer SOHO-ähnlichen Instrumentierung sollten die beiden Sonden ursprünglich in den den Schäfermonden entsprechenden Lagrange Punkten L4 und L5 platziert werden. Auf die aufwendigen Bahnmanöver hat man verzichtet und lässt die Sonden stattdessen auf ihren Orbits mit etwas Abständen etwas kleiner bzw. etwas größer als der Erdbahnradius langsam von der Erde weg driften.

Solar Maximum Mission SMM

§ 824 Als ein etwas ausführlicheres Beispiel für die Ergebnisse derartiger Missionen sei hier die Bedeutung der Röntgen- und Gammastrahlung im Flare, wie sie sich aus den SMM Untersuchungen ergibt, vorgestellt.

§ 825 Solare Gamma- und Röntgenstrahlung kann zur Untersuchung der Teilchenbeschleunigung auf der Sonne verwendet werden. Gammaemission wird durch die Wechselwirkung energiereicher geladener Teilchen mit den unteren Schichten der solaren Atmosphäre erzeugt. Bei den Teilchen handelt es sich im wesentlichen um Elektronen und Protonen, energiereich bedeutet dabei, dass die Elektronen Energien von mindestens 0.5 MeV haben, die Protonen Energien von einigen 10 MeV/nucl. Dabei ist 1 eV (Elektronenvolt), die kinetische Energie, die ein Elektron beim Durchlaufen einer Potentialdifferenz von 1 V gewinnt.

§ 826 Abbildung 5.25 gibt einen Überblick über einen Teil der Phänomene, die mit einer solaren Eruption (Flare) verbunden sind. Die einzelnen Phänomene sind in der Bildunterschrift kurz erwähnt, für unsere Betrachtung wichtig ist (1) die Energiefreisetzung im Flare. Die im Flare beschleunigten geladenen Teilchen können sich entlang der Magnetfeldlinien abwärts bewegen und erzeugen dort Gamma- und Röntgenemission (2). Oder sie können sich aufwärts bewegen (3,4) und in das interplanetare Medium entweichen.

§ 827 Solare Gammaemission⁹ setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen: (a) Kontinuumsmission durch Bremsstrahlung relativistischer Elektronen sowie oberhalb von ~ 1 MeV aus durch Doppler- und instrumentell bedingter Verbreiterung nicht mehr zu trennenden nuklearen Linien, (b) nukleare Strahlung angeregter CNO-Kerne führt zu einem Linienspektrum zwischen 4 und 7 MeV, (c) oberhalb 10 MeV Bremsstrahlung relativistischer Elektronen und (d) oberhalb 25 MeV Kontinuumsmission durch den Zerfall von Pionen.

⁹Diese einfache Formulierung erzeugt leicht ein klassisches Missverständnis. Physikalisch unterscheiden sich Gamma- und harte Röntgenstrahlung durch ihre Erzeugung: während letztere durch die Ablenkung eines Elektrons erzeugt wird, entsteht erstere im Kern eines Atoms. Die Energie eines γ s kann dabei deutlich geringer sein als die Energie eines Röntgenquants – vorausgesetzt, dass die Röntgenstrahlung erzeugende Elektron konnte eine hinreichende Energie abgeben. Da dies bei der Vergabe der Bezeichnungen fast immer der Fall war, hat sich teilweise das Missverständnis eingeschlichen, dass die Energie eines Röntgenquants immer kleiner ist als die eines Gammaquants. In einem gewissen Sinn lebt dieses Missverständnis in den Namen der Instrumente fort: die Röntgeninstrumente messen in einem niedrigeren, die Gammainstrumente in einem höheren Energiebereich. Da aber dem Photon nicht anzusehen ist, auf welche Weise es erzeugt wurde, messen beide Instrumententypen sowohl Gamma- als auch Röntgenphotonen. Unterschieden lassen sich beide nur, wie im Text dargestellt, durch das Spektrum: Kontinuum (Röntgen) vs. Linie (Gamma).

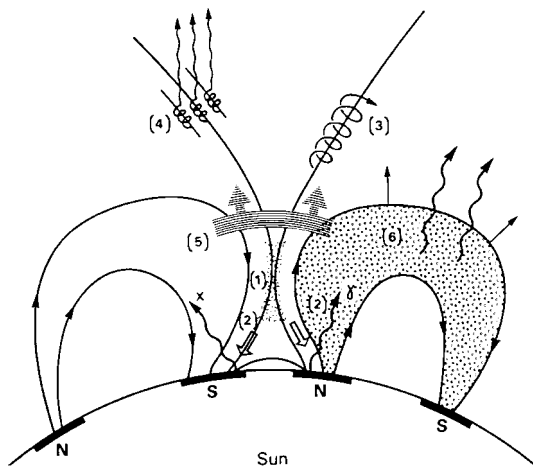


Abbildung 5.25: Phänomene im Zusammenhang mit einer solaren Eruption (Flare): (1) Durch Feldlinienverschmelzung wird Energie freigesetzt, die u.a. zu einer Beschleunigung energiereicher Teilchen führt. (2) Teilchen, die sich abwärts in Richtung auf die Photosphäre bewegen, erzeugen dort Gamma- und Röntgenstrahlung. (3) Teilchen, die sich aufwärts bewegen, können entweichen, wobei (4) entweichende Elektronen zusätzlich Radioemission mit genau definierten Merkmalen erzeugen. (5) Die Energiefreisetzung kann auch eine Stoßwelle (Shock) auslösen, die sich durch die Sonnenatmosphäre nach außen bewegt und zu einer zusätzlichen Teilchenbeschleunigung führen kann. (6) Ein Teil der Teilchen ist in geschlossenen Magnetfeldbögen gefangen und erzeugt dort Radioemission mit Merkmalen, die sich von denen der durch die entweichenden Teilchen erzeugten Radioemission unterscheiden [142]

§ 828 Die wichtigsten Gammalinien sind die 2.23 MeV und die 4.43 MeV Linie. Die erstere entsteht durch den Einfang schneller Neutronen in der Photosphäre, die Mindestenergie des Neutrons muss dabei 30 MeV betragen. Der Einfang erfolgt durch ^1H , das sich dann unter Abgabe eines Gammaquants in ^2D umwandelt. Die 4.43 MeV Linie entsteht beim Übergang des ^{12}C von einem angeregten Zustand in einen mit geringerer Energie. Die Anregung kann dabei durch radioaktiven Zerfall oder inelastische Stöße mit energiereichen Teilchen erfolgen.

§ 829 Abbildung 5.26 zeigt ein Beispiel für ein solares Gammaspektrum, aufgenommen während des Flares am 6. März 1989 im Bereich zwischen 0.3 und 9 MeV. Unterhalb von 1 MeV überwiegt Kontinuumsmission durch Elektronenbremsstrahlung. Linien aus dem Li-Be-Komplex ($\alpha-\alpha$), aus Positronenvernichtung und Eisen sind überlagert. Zu höheren Energien hin wird das Spektrum von Linienemission dominiert. Oberhalb von 7.2 MeV fällt das

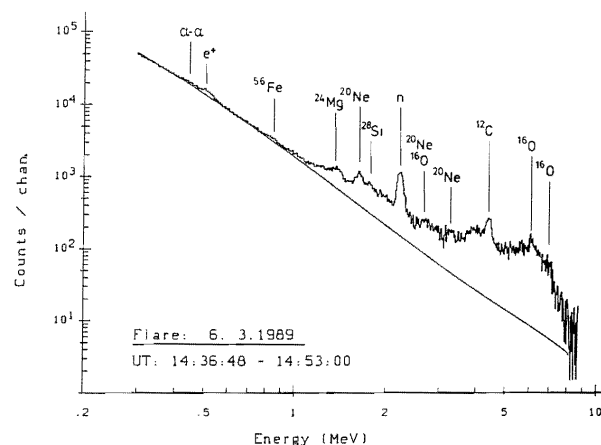


Abbildung 5.26: Solares Gammaspektrum mit deutlich ausgeprägten Linien, Beobachtungen des Gamma Ray Spectrometers GRS auf SolarMax am 6. März 1989 [201]

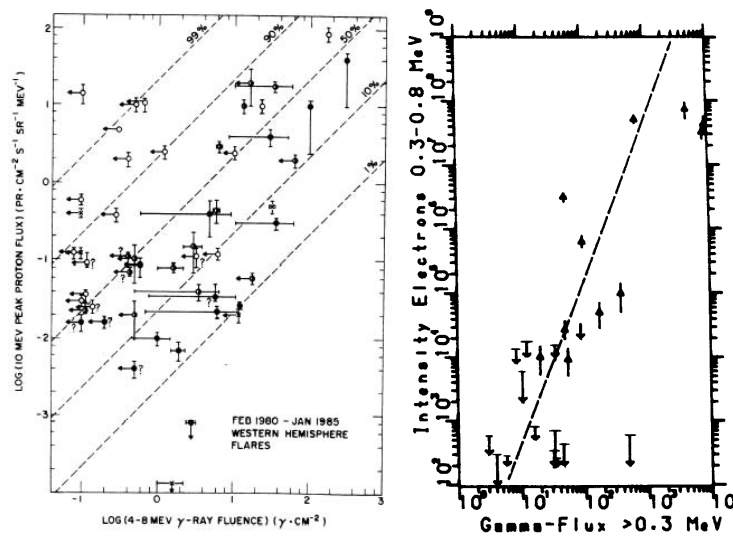


Abbildung 5.27: Vergleich von auf der Sonne wechselwirkenden Teilchen (angezeigt durch die Gammaemission) und im interplanetaren Raum beobachteten Teilchenintensitäten. Im linken Teil sind Protonen und Gamma-Linienemission verglichen [40], im rechten Elektronen und Gamma-Kontinuumemission [123]

Spektrum steil ab, da es oberhalb dieser Energie keine starken nuklearen Linien mehr gibt. Die durchgezogene Linie ist eine Fortsetzung des Spektrums der Kontinuumemission, wie sie sich durch einen Fit an die Daten unterhalb 1 MeV ergibt. Der Unterschied zwischen dem Elektronenkontinuum und den nuklearen Linien kann uns helfen, zwischen den Beiträgen von beschleunigten Elektronen und Nukleonen zum Spektrum zu unterscheiden. Wir können auf diese Weise also ein Maß für das Verhältnis zwischen im Flare beschleunigten Elektronen und Nukleonen bestimmen. Da die meisten Nukleonen Protonen sind, kann man dieses Verhältnis auch kurz als e/p bezeichnen.

§ 830 Wenn wir auf diese Weise etwas über die Teilchen lernen können, die auf der Sonne wechselwirken, stellt sich natürlich sofort die Frage, ob es dann nicht sinnvoll wäre, mit direkten Teilchenbeobachtungen im interplanetaren Raum zu vergleichen (z.B. Helios, für die Beschreibung des Detektors siehe § 772). Dazu zeigt Abb. 5.27 im linken Teil die Intensität der im interplanetaren Raum beobachteten Protonen aufgetragen gegen den Fluss der Gammalinienemission als einem Maß für die auf der Sonne wechselwirkenden Protonen (wenn wir mit den Symbolen von Abb. 5.25 sprechen wollen, so ist hier die Protonenkomponente von Phänomen (2) gegen die der Phänomene (3,4) aufgetragen). Jedes Symbol entspricht einem solaren Flare. Die gestrichelten Linien geben eine grobe Abschätzung für den relativen Anteil entweichender Teilchen an. Ereignisse, die mit einem Pfeil versehen sind, geben obere Grenzen in der betreffenden Größe an. Zwischen den beiden Teilchenpopulationen, entweichend und wechselwirkend, besteht keine Korrelation, insbesondere gibt es eine relativ große Zahl großer Protonenereignisse, für die keine Gammalinienemission beobachtet wird (linke obere Ecke). In diesen Ereignissen entweichen also praktisch alle Protonen, kaum eines der Teilchen hat die Möglichkeit, mit der Photosphäre der Sonne zu wechselwirken.

§ 831 Diese Ergebnisse sind überraschend, da man ursprünglich erwartet hatte, dass die auf der Sonne beschleunigten Teilchen in gleichem Maß entweichen wie wechselwirken können. Der in Abb. 5.27 dargestellte schwache Zusammenhang zwischen diesen Teilchenpopulationen hat dazu geführt, dass dieses Bild revidiert werden musste. Als Lösungsvorschläge werden diskutiert: (a) Flares können die Teilchen in unterschiedlichen Höhen beschleunigen, wobei bei Flares in größeren Höhen die Teilchen leichter entweichen können (viele Teilchen im interplanetaren Raum, wenig Gammalinienemission), bei Flares in geringerer Höhe dagegen die meisten Teilchen wechselwirken und nur wenige entweichen können; (b) entweichende und wechselwirkende Teilchen werden im gleichen Mechanismus beschleunigt, jedoch sind die Mechanismen, die den Teilchen ein Entweichen erlauben, von Ereignis zu Ereignis variabel; (c) entweichende und wechselwirkende Teilchen werden im gleichen Mechanismus beschleunigt,

jedoch ist diese Beschleunigung nicht isotrop, sondern es werden in einigen Ereignissen die Teilchen bevorzugt in Richtung auf die Photosphäre beschleunigt und erzeugen dort Gammaemission, in anderen Ereignissen werden sie bevorzugt in die entgegengesetzte Richtung beschleunigt und können daher entweichen; (d) die wechselwirkenden und entweichenden Protonen werden in unterschiedlichen Mechanismen erzeugt, so dass überhaupt kein Zusammenhang zu erwarten ist (außer vielleicht ein schwacher Zusammenhang, der sich aus der Gesamtenergie ergibt, die im Flare freigesetzt wird).

§ **832** Im rechten Teil der Abbildung ist, ähnlich wie im linken Teil, der Zusammenhang zwischen wechselwirkenden und entweichenden Teilchen aufgetragen, hier aber für Elektronen im interplanetaren Raum und Gammakontinuumsemission. Auch wenn die Korrelation zwischen den beiden Größen eher schwach ist, zeigt sich in dieser Abbildung doch ein Zusammenhang zwischen entweichenden und wechselwirkenden Teilchen. Dieses unterschiedliche Verhalten von Elektronen und Protonen stellt aber alle unsere bisher vorgeschlagenen Lösungsversuche in Frage, da diese ein gleiches Verhalten von Elektronen und Protonen vorhersagen würden. Eine alternative Interpretation besteht darin, dass ein Mechanismus, nämlich der Flare, entweichende und wechselwirkende Teilchen beschleunigt und ein zweiter Mechanismus zusätzlich Teilchen beschleunigt. Dieser zweite Mechanismus arbeitet in relativ großer Höhe (deshalb entweichen die Teilchen und wechselwirken nicht) und er beschleunigt relativ mehr Protonen als Elektronen (daher findet man bei den Elektronen weiterhin einen relativ guten Zusammenhang zwischen den wechselwirkenden und den entweichenden Teilchen).

§ **833** Dieser Mechanismus ist so aber schon sehr speziell und erweckt den Eindruck, als sei er etwas weit hergeholt. Gehen wir dazu noch einmal zurück zu Abb. 5.25. Dort war als (5) eine Stoßwelle als eine mögliche Folge eines Flares eingezeichnet worden. Stoßwellen können, wie wir von der Bugstoßwelle der Erde und anderer Planeten wissen, Teilchen beschleunigen. Wenn sich im Flare erzeugte Stoßwellen in das interplanetare Medium ausbreiten, so können diese dort ebenfalls direkt nachgewiesen werden, zusammen mit den an ihnen beschleunigten Teilchen. Dabei zeigt sich auch, dass diese Stoßwellen offensichtlich bei ihrer Beschleunigung die Protonen gegenüber den Elektronen bevorzugen. Damit können wir aber die Beobachtungen erklären: die im Flare beschleunigten Teilchen können teilweise wechselwirken und teilweise entweichen. Dadurch sollte ein Zusammenhang zwischen Gammaemission und Teilchen im interplanetaren Medium bestehen. Dieser Zusammenhang wird aber dadurch gestört, dass ein zweiter Mechanismus, die Stoßwelle, zusätzliche entweichende Teilchen erzeugt. Da diese zusätzlichen Teilchen im wesentlichen Protonen sind aber kaum Elektronen, besteht zwischen Elektronen und Gammakontinuumsemission ein relativ guter Zusammenhang. Genauere Untersuchungen (e/p-Verhältnisse, statistische Studien über viele Ereignisse, Definition verschiedener Ereignistypen) haben in den letzten Jahren gezeigt, dass dieses Szenario mit den Beobachtungen von Teilchen ebenso wie elektromagnetischer Strahlung über einen weiten Frequenzbereich in Übereinstimmung ist.

§ **834** Man kann einen Hinweis auf einen zweiten Beschleunigungsmechanismus auch in den Teilchendaten finden. Dazu betrachtet man die Zeiten, zu denen die Teilchen auf der Sonne injiziert wurden (diese lassen sich aus den Einsatzzeiten der im interplanetaren Raum beobachteten Teilchen bestimmen), siehe Abb. 5.28. Die elektromagnetische Strahlung (harte Röntgenstrahlung, Radioemission) dagegen zeigt an, wann Teilchen auf der Sonne wechselwirken (Röntgenstrahlung) oder entweichen (Radioemission). Die erste senkrechte gestrichelte Linie gibt den Einsatz der elektromagnetischen Strahlung und damit des Flares an. Ungefähr gleichzeitig damit erfolgt eine Injektion der Elektronen. Zu diesem Zeitpunkt werden allerdings noch keine Protonen injiziert. Mit einer Verzögerung von ungefähr 10 min werden die Protonen injiziert. Diese sind von einer erneuten, aber relativ kleineren Elektroneninjektion begleitet. Zu dieser Zeit werden auch harte Röntgenstrahlung und Radio/Mikrowellenemission erzeugt. Diese zweite Injektion kann als Hinweis auf die Stoßwelle interpretiert werden. Die Eigenschaften der Teilcheninjektion sind genau in Übereinstimmung

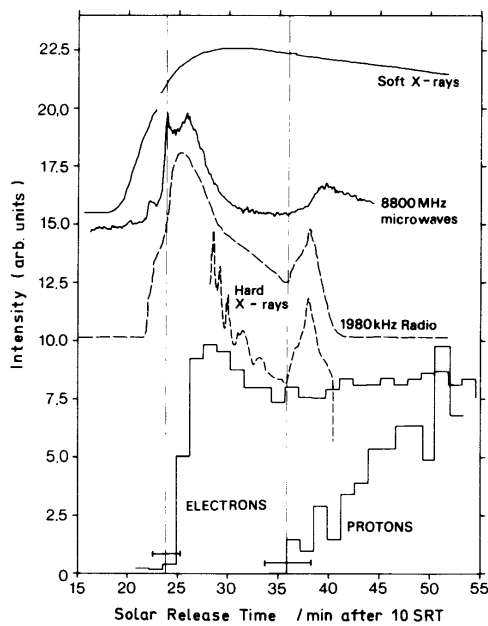


Abbildung 5.28: Zeitverlauf der Teilchenbeschleunigung auf der Sonne, angezeigt durch die harte Röntgenstrahlung und Radiowellen und der Injektion energiereicher Teilchen in das interplanetare Medium (zurückgerechnet aus den Beobachtungen energiereicher Teilchen im Raum). Die Elektronen werden sofort zu Beginn des Ereignisses injiziert, Protonen werden mit einer Verzögerung von ca. 10 min injiziert, gemeinsam mit einem erneuten Anstieg von Röntgen- und Radioemission. Das e/p-Verhältnis in der zweiten Injektion ist deutlich geringer als in der ersten [121]

mit dem, was wir für diesen Wundermechanismus gefordert haben: es muss eine zweite Injektion geben (hier um 10 min verzögert durch die Zeit, die die Stoßwelle benötigt, um sich auszubilden und Teilchen zu beschleunigen) und diese muss in relativ größerer Zahl Protonen beschleunigen als Elektronen.

§ 835 Auch heute, mehr als zwei Jahrzehnte nach dem SMM Start, mit den vielen SOHO Beobachtungen und dem vor einem Jahr gestarteten Stereo verstehen wir die Rolle von Flare und Stoßwelle bei der Teilchenbeschleunigung immer noch nicht so genau. Einige offene Fragen sind z.B. in [119, 120] zusammen gefasst.

5.3 Der interplanetare Raum

§ 836 Der interplanetare Raum ist durch den Sonnenwind, ein ca. 1 Mio K heißes, kontinuierlich mit einer Geschwindigkeit von 400 km/s von der Sonne abströmendes Plasma bestimmt. Dieses Plasma führt das solare Magnetfeld mit sich – die im interplanetaren Raum zu messenden Größen sind also elektromagnetische Felder und geladene Teilchen. Beide sind nicht dem remote sensing zugänglich sondern nur in-situ Messungen. Zusätzlich enthält der interplanetare Raum noch energiereiche Teilchen aus verschiedenen Quellen: die an Stoßwellen vor CMEs beschleunigten Energetic Storm Particles ESPs können aus der nicht-thermischen Schweif der Sonnenwindpopulation betrachtet werden. Solare energiereiche Teilchen (Solar Energetic Particles SEPs) haben höhere Energien und werden in Flares oder von der CME in Sonnennähe beschleunigt. Noch höhere Energie hat die galaktische kosmische Strahlung (Galactic Cosmic Rays GCRs)

§ 837 Die Messgrößen im interplanetaren Raum sind wieder das Plasma, das elektromagnetische Feld sowie energiereiche Teilchen. Damit unterscheidet sich die benötigte Instrumentierung nicht von der bereits für die Magnetosphäre beschriebenen – abgesehen von gegebenenfalls anderen Messbereichen und anderem Ansprechvermögen. Auf die Vorstellung weiterer Instrumente verzichte ich daher – diese lassen sich über den NASA Master Catalogue [505] auffinden.

§ 838 In der Frühzeit der Raumfahrt war der interplanetare Raum kein eigenständiges Forschungsziel: man wollte zum Mond oder zu anderen Planeten und nahm mehr oder weniger gerne auch den obligatorischen Geigerzähler zur Messung der kosmischen Strahlung und

vielleicht auch mal das eine oder andere einfache Plasmainstrument mit – aber das wars. Trotzdem sind es gerade die langen, auf die äußeren Planeten gerichteten Missionen Pioneer [499] und Voyager [476], die uns heute die einzigen Informationen über den interplanetaren Raum jenseits der Planeten liefern können.

§ 839 Der geringe Enthusiasmus für das interplanetare Medium ist nicht in mangelndem Interesse begründet: bereits vor den ersten Satelliten hat man aus den im Vergleich zur Dauer des Flares viel zu langen Zeitprofilen solarer Teilchen auf der Erde geschlossen, dass diese Teilchen sich nicht direkt in Richtung auf die Erde ausbreiten sondern durch das interplanetare Medium diffundieren. Auch wusste man bereits von dem etwas befremdlichen Verhalten des Geigerzählers auf den frühesten amerikanischen Satelliten das sich Teilchen und Plasmen ‘seltsam’ verhalten können. Unter diesen Gesichtspunkten wäre eine genaue Untersuchung des Plasmas im interplanetaren Raum nahe liegend gewesen.

§ 840 Die Messung von Teilchen und Plasma ist stets in-situ Messung, d.h. es werden die entsprechenden Größen am Ort des Raumfahrzeugs bestimmt. Plasma und Raumfahrzeug bewegen sich relativ zueinander: zum einen, da der Sonnenwind radial expandiert, zum anderen, da sich das Raumfahrzeug auf seinem Orbit bewegt. Jede Veränderung gemessene Änderung in Plasmametern kann daher durch eine lokale zeitliche Änderung, eine räumliche Änderung oder auf eine Kombination aus beiden bewirkt sein. Messungen an einem Punkt im Raum sind daher schwer zu interpretieren – dies gilt nicht nur für den interplanetaren Raum sondern genauso für die Magnetosphäre.

§ 841 Um die durch dieses Interpretationsproblem eingeführten Unsicherheiten zu verringern, ist eine Messung an mehreren Punkten im Raum sinnvoll. Diese Idee hat man bereits in der Mitte der 1970er realisiert: mit den beiden Helios Raumsonden [523, 524] zur Untersuchung des interplanetaren Raumes. Die Sonden fliegen auf hochgradig elliptischen Bahnen mit einem Perihel in der Nähe von 0.3 AU und einem Aphel bei 1 AU; die Umlaufzeit beträgt ca. 180 Tage. Beide Sonden trugen nur Plasma-, Feld- und Teilcheninstrumente. Da auf Instrumente im Optischen verzichtet wurde, war eine Ausrichtung des Satelliten nicht erforderlich; die Stabilisierung konnte als Spinstabilisierung realisiert werden.

§ 842 Die wichtigsten Ergebnisse der Helios Missionen sind die Beobachtungen in der inneren Heliosphäre sowie die Beobachtungen von zwei bzw. in Kombination mit einem erdgebundenen Raumfahrzeug von drei Punkten im Weltraum. Inhaltlich wichtig waren die Identifikation von Plasmawellen und -turbulenz als die Ursache der Teilchenstreuung im interplanetaren Raum, die Beobachtung interplanetarer Stoßwellen sowie die Identifikation so genannter magnetischer Wolken als den durch den interplanetaren Raum flügenden Plasmagebildeten koronaler Massenausstöße.

§ 843 Der International Sun Earth Explorer ISEE [440, 530, 531] basiert ebenfalls auf der Verwendung mehrerer Raumfahrzeuge zur Untersuchung der räumlichen und zeitlichen Variabilität von Plasmen. Ziel ist das Verständnis magnetosphärischer Prozesse in Abhängigkeit von Änderungen im Sonnenwind. Dazu befinden sich zwei der Satelliten, ISEE-1 und ISEE-2, in der Magnetosphäre; der dritte Satellite, ISEE-3, dagegen befindet sich im Lagrange Punkt und dient als Warnboje für die Störungen, die mit dem Sonnenwind herangetragen werden. ISEE-3 wurde häufig zusammen mit den Helios-Raumsonden für Multi-Spacecraft Untersuchungen solarer Ereignisse verwendet.

§ 844 Das Konzept der Beobachtung von verschiedenen Punkten aus wurde ursprünglich auch bei Ulysses [474] aufgegriffen: alle bisherigen Missionen haben das interplanetare Medium in der Ebene der Ekliptik untersucht. Ulysses wurde durch ein Swing-By Manöver am Jupiter (siehe Abschn. 2.7.2 und Abb. 2.33) aus dieser Ebene in eine Bahn nahezu senkrecht zur Ekliptik katapultiert. In der ursprünglichen Planung sollten zwei Raumsonden mit unterschiedlichem Umlaufsinn in diese Bahn katapultiert werden, so dass sich zusammen mit einer erdgebundenen Raumsonde wieder Dreipunkt-Beobachtungen ergeben hätten. Aus Kostengründen wurde nur eine Raumsonde realisiert – diese hat aber dennoch die sehr unterschiedlichen Plasmaeigenschaften in der Ekliptik und in hohen Breiten nachweisen können.

Planet	große Halb- achse [AU]	Exzentri- zität	Inkli- nation	siderische Umlaufzeit	mittlere Bahnge- schwin- digkeit	synodische Umlaufzeit
Merkur	0.3871	0.206	7°00'	87.969 d	47.89	115.9 d
Venus	0.7233	0.007	3°24'	224.701 d	35.04	1 a 218.7 d
Erde	1	0.017	0°	365.256 d	29.80	–
Mars	1.5237	0.093	1°51'	1 a 321.73 d	24.14	2 a 49.5 d
Jupiter	5.2026	0.048	1°9'	11 a 314.84 d	13.06	1 a 33.6 d
Saturn	9.5547	0.056	2°30'	29 a 167.0 d	9.64	1 a 12.8 d
Uranus	19.2181	0.046	0°46'	84 a 7.4 d	6.80	1 a 4.4 d
Neptun	30.1096	0.009	1°47'	164 a 280.3 d	5.43	1 y 2.2 d
[Pluto]	39.4387	0.246	17°10'	247 a 249.0 d	4.74	1 a 1.5 d]

Tabelle 5.2: Bahnparameter der Planeten; Pluto ist nach heutigem Verständnis kein Planet mehr

5.4 Andere Planeten

§ 845 Die anderen Planeten unseres Sonnensystems sind durch die gleichen Einflussgrößen, die Sonne und den interplanetaren Raum, geformt wie auch die Erde. Daher ist ein Vergleich dieser Planeten mit der Erde zum Verständnis der Wechselwirkungen und zum Testen oder Falsifizieren von Hypothesen hilfreich.

§ 846 Allerdings sind nicht alle Planeten für diesen Vergleich geeignet. Nur die inneren Planeten, die erdähnlichen Planeten, bestehen aus einem festen Planetenkörper mit einer umgebenden Atmosphäre. Die äußeren Planeten (von Jupiter an) dagegen sind Gasbälle mit nur sehr kleinen Kernen (oder ohne solche). Zwar haben einige der Monde dieser äußeren Planeten Atmosphären und sind damit zumindest in ihrer Struktur den erdähnlichen Planeten ähnlich, jedoch sind die Temperaturen dort zu gering, als dass sich Atmosphären ausbilden könnten, die zumindest im Hinblick auf die Zusammensetzung auch nur die entfernteste Verwandtschaft mit der Erdatmosphäre haben – in anderen Aspekten können sich dagegen überraschende Vergleichsmöglichkeiten ergeben.

5.4.1 Das Planetensystem

§ 847 Neben der Sonne sind die Planeten die größten Körper in unserem Sonnensystem, kleinere Körper sind die Planetenmonde, die Asteroiden und die Kometen. Die Planeten bewegen sich auf elliptischen Bahnen um die Sonne, der sonnennächste Planet Merkur in einem Abstand von 0.38 AU (1 AU = 1 astronomical unit = 149 Mio. km = mittlerer Abstand der Erde von der Sonne), der sonnenfernste Planet Pluto¹⁰ in einem Abstand von ca. 40 AU. Die Orbits dieser beiden Planeten haben die größte Exzentrizität, so taucht Pluto noch in die Umlaufbahn seines nächsten Nachbarn, des Neptun, ein. Von der Erde an nach außen gehend haben alle Planeten Monde in unterschiedlicher Anzahl, die großen äußeren Planeten haben auch Ringe. Abgesehen von Pluto sind die Bahnebenen der Planeten nur leicht gegen die Ebene der Ekliptik geneigt, die Rotationsperioden schwanken zwischen 88 Tagen (Merkur) und 248 Jahren (Pluto). Tabelle 5.2 fasst die Bahnparameter der Planeten zusammen.¹¹

¹⁰Sorry, das ist eine etwas ältere Darstellung: Von seiner Entdeckung 1930 bis zur Neufassung des Begriffs Planet durch die Internationale Astronomische Union (IAU) galt er als der neunte Planet des Sonnensystems. Im September 2006 wurde Pluto zum Kleinplanetennummer 134340 herunter gestuft; seine vollständige offizielle Bezeichnung lautet nunmehr (134340) Pluto.

¹¹Anmerkungen zur Tabelle: (a) die Jahreslänge ist definiert als 1 a = 365.256 d. (b) die siderische Umlaufzeit oder Rotationsperiode bezeichnet die Zeit, die ein Planet in einem ortsfesten System, z.B. bezogen auf den Fixsternhimmel, für einen Umlauf um die Sonne benötigt. (c) die synodische Umlaufzeit oder Rotationsperiode bezeichnet die Zeit zwischen zwei aufeinander folgenden identischen Konfigurationen von Planet und Erde: z.B. wenn beide in Opposition stehen oder beide auf einem von der Sonne ausgehenden Radius

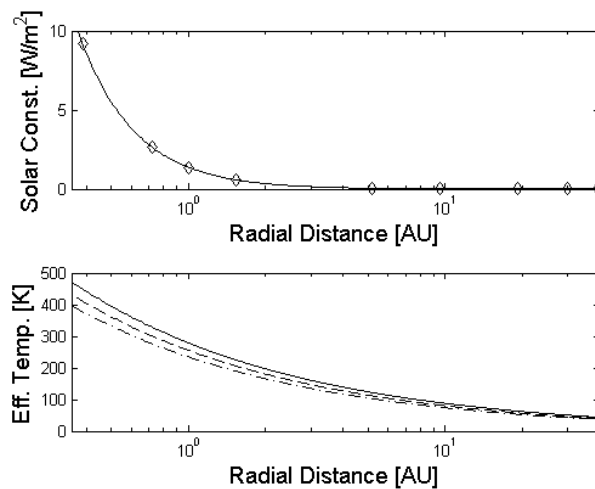


Abbildung 5.29: Abnahme solarer Fluss und Effektivtemperatur mit dem Abstand von der Sonne

§ 848 Die *erdähnlichen Planeten* (terrestrial planets; Merkur, Venus, Erde, Mars), die auch die inneren Planeten sind, sind relativ klein (die Erde ist der größte der inneren Planeten) und haben hohe mittlere Dichten (zwischen 4 und 6 g/cm³). Sie haben feste Oberflächen mit schweren, eisenhaltigen Kernen, und darüber liegenden Atmosphären, die allerdings in der Dichte hochgradig unterschiedlich sind. So hat der Merkur eine extrem dünne Atmosphäre, die man kaum als eine solche betrachten kann. Die Venus dagegen hat eine sehr dichte Atmosphäre. Die inneren Planeten haben wenige oder gar keine Monde (die Erde hat einen Mond, der Mars zwei) und sie haben keine Ringe.

§ 849 Die *Riesenplaneten* (giant planets, Jupiter, Saturn, Uranus, und Neptun) sind wesentlich größer als die terrestrischen Planeten und bestehen im wesentlichen aus Wasserstoff und Helium. Nach Innen gehend nimmt der Druck hohe Werte an, in der Größenordnung des millionenfachen des Druckes am Boden der Erdatmosphäre. Ob alle der großen Planeten feste Kerne haben, ist noch nicht geklärt. Ihre Dichten liegen zwischen 0.7 und 1.7 g/cm³. Diese Planeten haben viele Monde und können Ringsysteme haben. Die großen Planeten strahlen in der Regel mehr Energie ab als sie von der Sonne erhalten (Jupiter strahlt ungefähr das doppelte an Energie ab, Saturn das 3.5fache). Die zusätzliche Energie wird entweder aus Gravitationsenergie freigesetzt oder ist Restwärme aus der Zeit der Entstehung des Planeten. Diese Planeten sind der Sonne ähnlicher als den erdähnlichen Planeten. Hätte der Jupiter bei der Formation des Planetensystems etwas mehr Masse ansammeln können, so hätte bei ihm Kernfusion einsetzen können und unser Sonnensystem hätte sich zu einem Doppelsternsystem entwickelt.

§ 850 Aus diesem Schema heraus fällt der äußerste ehemalige Planet Pluto.¹² Er ist eher wie ein Mond zusammengesetzt, hat einen festen Kern und keine Atmosphäre. Die ungewöhnlichen Bahnparameter (große Neigung der Bahnebene gegen die Ebene der Ekliptik, hohe Exzentrizität der Umlaufbahn) lassen vermuten, dass Pluto bei der Entstehung des Sonnensystems nicht als Planet entstanden ist, sondern dass er ein eingefangener Asteroid oder ein ausgerissener Neptunmond ist.

§ 851 Die großen Unterschiede zwischen den inneren Planeten und den Riesenplaneten lassen sich am leichtesten verstehen, wenn man die solare Einstrahlung am Ort der Planeten betrachtet. Abbildung 5.29 zeigt dazu im oberen Teil die Abnahme des solaren Flusses mit dem Abstand, die Rhomben markieren die Orte der Planeten. Im unteren Teil der Abbildung ist die sich nach (5.1) ergebende Effektivtemperatur gegeben, wobei die Albedo der Planeten

ausgerichtet sind.

¹²Pluto wurde 2007 von seinem Planetenstatus

für die obere Kurve gleich 0 gesetzt wurde (vollständige Absorption und damit die maximal erreichbare Effektivtemperatur (5.1). Für die mittlere Kurve wurde eine Albedo von 30% (entsprechend der Erdalbedo) und für die untere Kurve eine von 50% angenommen. Der geringe solare Fluss bei den äußeren Planeten würde dort auf maximale Effektivtemperaturen (bei vollständiger Absorption aller einfallenden Strahlung) zwischen ca. 50 K (Pluto) und ca. 130 K (Jupiter) führen, d.h. viele der von der Erde bekannten atmosphärischen Gase wären nur noch in flüssiger oder fester Phase vorhanden (z.B. Kohlendioxid, Wasserdampf, auf Pluto auch Methan, Stickstoff und Sauerstoff). Andererseits ist die Temperatur so niedrig, dass sie ein Entweichen der leichten Bestandteile (Wasserstoff und Helium) nicht erlaubt. Daraus erklären sich die hohen Anteile von Wasserstoff und Helium in den Atmosphären der äußeren Planeten. Deren Atmosphären haben zwar nicht vollständig ihren Urzustand bewahrt, sie bilden aber doch eine sehr gute Annäherung an die Bedingungen, die anfangs im Sonnensystem geherrscht haben müssen.

5.4.2 Die Instrumente

§ 852 Unser Wissen über das Planetensystem hat sich angesammelt durch Beobachtung der Planeten von der Erde aus (die so genannten Marskanäle sind bereits 1877 von Shirapelli vielleicht nicht unbedingt entdeckt aber zumindest beschrieben worden), durch remote sensing von Satelliten im Vorbeiflug oder aus dem Orbit um den Planeten und in Einzelfällen auch durch Lander. Die remote sensing Verfahren sind den in der Erdfernerkundung verwendeten vergleichbar – auf Grund der härteren Randbedingungen (geringere Masse, geringere Datenübertragungsrate, häufig auch geringere Leistung) fliegt auf einer planetaren Mission in der Regel entweder ein Instrumententyp der Vorgeneration oder ein sehr experimentelles Instrument.

§ 853 Der Klassiker in der Erkundung der Planeten ist die in der Erdfernerkundung so geschmähete Videokamera (siehe § 373–379); Beispiele für ihren Einsatz in der Planetenforschung sind bereits in § 379 gegeben.

5.4.3 Die Missionen

§ 854 Missionen zu anderen Planeten kann man, je nach Orbit des Raumfahrzeugs, unterteilen in

- Vorbeiflieger: die Raumsonden fliegen am Himmelskörper vorbei, wobei teilweise dessen Schwerefeld zur Bahnänderung (Swing By) ausgenutzt wird. Bei geeigneter Konstellation lassen sich auf so mit einer Raumsonde mehrere Planeten besuchen. Beispiele: Pioneer, Voyager
- Orbiter: die Raumsonde schwenkt in ein Orbit um den Zielplaneten ein und wird damit ein Satellit desselben.
- Lander: die Raumsonde selbst oder ein Teil von ihr landet mehr oder weniger sanft auf dem Himmelskörper:
 - ein einfacher Lander landet weich und misst in seinem Umfeld.
 - interessanter wird es, wenn sich der Lander oder Teil des Landers durch die Gegend bewegen können (Rover).
 - weniger weiche Landungen werden genutzt, um nicht die Oberfläche sondern tiefere Schichten zu erkunden. Der Penetrator bohrt sich in die feste Planetenoberfläche, der Hydrobot dringt in Gewässer ein (es muss ja kein Wässersee sein) und der Kryobot schmilzt sich in eine Eisschicht ein oder durch diese hindurch.
- Sample Return: die aufwendigste Form der Planetenerkundung fährt nicht nur zum Messen hin sondern landet, sammelt Proben ein und bringt diese dann wieder zur Erde zurück.

§ 855 Die ersten planetaren Missionen hatten die Venus zum Ziel – auch heute auf Grund des auf der Venus aus dem Ruder gelaufenen Treibhauseffektes wieder ein lohnendes Ziel. Die UdSSR war jeweils etwas schneller, hat allerdings bei beiden Erstflügen den Funkkontakt

verloren: im Februar 1961 flog Venera 1 [596] dichter als 100 000 km an der Venus vorbei, im Dezember 1962 flog Mars 1 [543] im Abstand von ca. 11 000 km am Mars vorbei. Die ersten erfolgreichen Missionen durften dafür die Amerikaner für sich verbuchen: im August 1962 flog Mariner 2 [541] im Abstand von weniger als 35 000 km an der Venus vorbei, im November 1964 schickte Mariner 4 [542] die ersten Bilder vom Mars zurück.

Verständnisfrage 36 Warum eigentlich immer nur Flyby und nicht gleich richtiger Flug zum Planeten?

§ 856 Die nächsten Missionen der UdSSR zielten alle auf die Venus: im November 1965 schlug Venera 3 [597] auf der Venus ein, im June 1967 drang Venera 4 [598] in die Venus-Atmosphäre vor und im Januar 1965 erfolgte mit Venera 5 [599] der erste Fallschirmabstieg in die Venus-Atmosphäre – allerdings ging der Funkkontakt verloren.

Verständnisfrage 37 Warum waren die Altvorderen so auf Venus Flyby versessen und haben nicht den Mars besucht? Angst vor kleinen grünen Männchen sollte es doch hoffentlich nicht gewesen sein.

§ 857 Missionen zu den inneren Planeten, d.h. Merkur, Venus und Mars, wurden von der UdSSR und den USA kontinuierlich ausgeführt und verfeinert. Für die photographischen Missionen ist dabei der Mars auf Grund seiner dünneren Atmosphäre interessanter; er wurde im Rahmen des Viking Programms [433] der USA mehrfach un werbetätig besucht. In den 1990ern war noch einmal kurzfristig die Venus modern (Magellan [540, 463]), die meisten anderen Missionen zielen auf den Mars, teilweise auch mit speziellen Fragen wie Klimafor schung und geologische Strukturen. 2004 startete MESSENGER (MErcury Surface, Space ENvironment, GEochemistry and Ranging [448]) zum Merkur.

§ 858 Die ersten Missionen zu den äußeren Planeten waren 1972 Pioneer 10 zum Jupiter, 1973 Pioneer 11 zu Jupiter und Saturn, sowie 1977 Voyager 1 ebenfalls zu Jupiter und Saturn sowie Voyager 2 zu Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun. Der letzte, jetzt degradierte Planet Pluto ist bisher noch nicht besucht worden – die 2006 gestartete Sonde New Horizons [392, 498] befindet sich auf dem Weg zu ihm.

§ 859 Die vielleicht interessanteste aktuelle planetare Mission ist Cassini–Huygens [338, 147, 454], bestehend aus Cassini als orbiter im Saturn-System und Huygens als Probe zum Sa turnmond Titan. Letzterer ist von besonderem Interesse, da seine Atmosphärenparameter so sind, dass Methan in allen drei Phasen vorkommen und damit die Rolle des Wassers auf der Erde übernehmen könnte. Womit sich sofort die Frage nach Leben auf Titan aufdrängt.

5.5 Climate And Weather in the Sun–Earth System: Energetic Particles and the Atmosphere

§ 860 In Zeiten der beginnenden Akzeptanz von Wandel¹³ wird gerade im Bereich Kli ma zunehmend nicht nur die Frage nach den anthropogenen Einflüssen sondern auch nach natürlichen Aspekten von Wandel gestellt. Da man sich allmählich daran gewöhnt, dass sich die Erde und noch stärker im Sinne von kleineren Zeitskalen und größeren Amplituden die Sonne ändert, wurde das Projekt internationale CAWSES – Climate and Weather in the Sun–Earth System [273, 274] ins Leben gerufen. In Deutschland erfolgt die Finanzierung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft DFG im Rahmen eines Schwerpunktprogramms sowie verschiedener Einzelprojekte.

§ 861 Die wesentlichen Ziele von CAWSES umfassen

¹³Hier ist nicht gemeint in Zeiten des (Klima-)Wandels – den hat es lange vor der Diskussion um den anthropogenen Treibhauseffekt gegeben – sondern in den Zeiten, in denen es den Menschen langsam dämmert, dass ihre Umwelt im unbelebten genauso dem Wandel unterworfen ist wie im belebten.

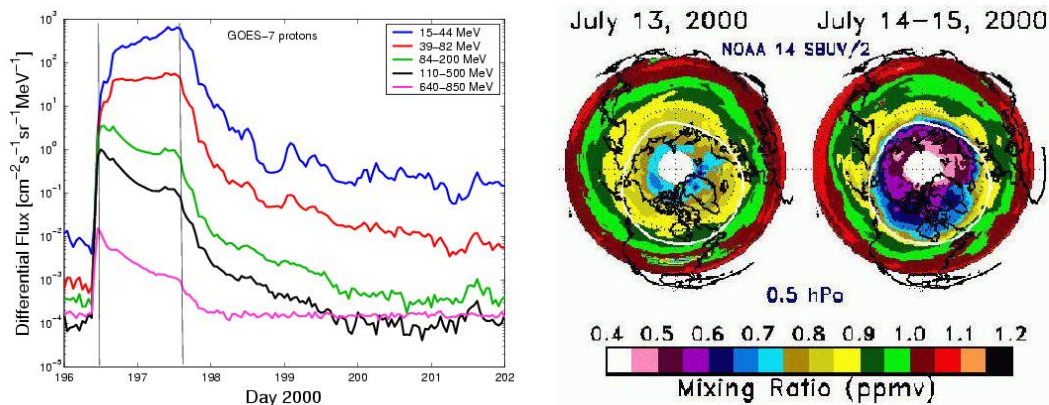


Abbildung 5.30: Right: Intensity–time profiles for the Bastille Day event (July 14, 2000); Left: variation in ozone concentration on the northern hemisphere [108]

- das Verständnis der durch die Sonne und ihre Aktivität gesteuerten Einflussgrößen auf das Klima sowie deren Variabilität. Zu den Einflussgrößen gehören neben der Solarkonstante auch die Variabilität in einzelnen Spektralbereichen (insbesondere im UV), die Variabilität des Sonnenwindes (und damit der Struktur der Magnetosphäre), (solare) energiereiche Teilchen sowie die galaktische kosmische Strahlung – letztere wird durch die solare Aktivität moduliert.
- das Verständnis der durch diese Einflussgrößen in der Atmosphäre ausgelösten physikalischen und chemischen Prozesse sowie deren Konsequenzen für die Atmosphäre.
- die Kombination dieser Effekte in einem globalen Klimamodell zum Verständnis des Einflusses solarer Aktivität auf das Klima sowie die Abschätzung der Bedeutung dieses Einflusses im Vergleich zu anthropogenen Einflüssen.

Jeder dieser Punkte wird in den Bereichen Beobachtungen (teilweise auch statistische Studien), Modellbildung (im Sinne von Verständnis der Prozesse, d.h. physikalisches Modell), numerische Modellierung (im Sinne von Abbildung des physikalischen Modells in einem Rechner) sowie die Validierung der Modelle.

§ 862 Wir sind im Rahmen von CAWSES mit einem Projekt zur Wechselwirkung energiereicher (solarer) Teilchen mit der Atmosphäre beteiligt. Einige der Ergebnisse in allgemeinverständlicher Form sind im folgenden Abschnitt als Beispiel für ein CAWSES Projekt vorgestellt.

§ 863 Within in the framework of the two DFG-Special Programs ‘Geomagnetic Variations’ and ‘CAWSES’ our group studies the consequences of precipitating energetic particles in the atmosphere. Sources of these particles are the magnetosphere and the Sun. The primary consequence of their precipitation is ionization of the atmosphere at heights between about 15 km and 100 km where the atmosphere under normal conditions is neutral. The secondary consequence of such ionization is a change in atmospheric chemistry, in particular the depletion of ozone.

§ 864 The left panel in Fig. 5.30 shows the intensity time profiles for the July 14, 2000, solar energetic particle (SEP) event (Bastille Day event) as observed in geostationary orbit. The profiles correspond to different proton energy range with the topmost profile (blue) representing the lowest energy (15–44 MeV) and the lowermost profile (magenta) representing the highest energies (640–850 MeV). The points at the left boundary represent background intensities. Thus during the event an increase in the lower energetic protons lasts for more than 1 day and amounts to more than 5 orders of magnitude. Thus a solar energetic particle (SEP) event is a strong forcing signal onto the atmosphere.

§ **865** The right panel in Fig. 5.30 shows ozone concentrations above 0.5 hPa, that is above about 45 km, in the northern hemisphere. The left part is observed on July 13 prior to the event. The normal latitudinal pattern with higher concentrations at low latitudes (ozone production regions) and lower concentrations at high latitudes is apparent. Observations directly over the pole are not available due to the inclination of the satellite orbit. The thin white ring marks the polar cap: here SEPs are not deflected by the geomagnetic field and can precipitate down into the atmosphere.

§ **866** The right part of the right panel of Fig. 5.30 shows the result of such particle precipitation: ozone concentrations inside the polar cap drop by 30–40% while they stay at constant level at lower latitudes.

§ **867** Our interest in energetic particles and ozone lies in three domains, see also the more detailed description in sect. 5.5.3:

- individual events: they are required for calibration of the model because the signal is large (see left panel in Fig. 5.30) and thus atmospheric responses are well defined.
- atmospheric consequences in case of a weakening geomagnetic field or even a field reversal. In this case, particle precipitation would not be limited to the polar cap but would occur over a more extended spatial region. Would this also cause a stronger depletion in ozone? The question is not as far fetched as it appears because polarity reversals often also are accompanied by climate change and the extinction of species. This question is topic of our project ‘Numerical simulation of the atmospheric ionization and the generation of cosmogenic nuclides for different topologies of the geomagnetic field’ within the framework of the DFG Schwerpunktprogramm ‘Geomagnetic Variations’.
- climate consequences: ozone has radiative properties. Thus ozone concentrations determine the local absorption and emission coefficients of the atmosphere. In consequence, thermal patterns in the atmosphere can be modified which in turn influences the circulation. This question is topic of a common project with the Max-Planck Institute for Meteorology (Hamburg) ‘The atmospheric response to solar variability: simulations with a general circulation and chemistry model for the entire atmosphere’ within the framework of the DFG Schwerpunktprogramm ‘CAWSES – Climate and Weather in the Sun–Earth System’.

While the latter two projects are the more ambiguous ones, the first is the most important one: only if that model sequence works correctly, also the more interesting questions can be tackled. Thus we will here briefly discuss its main steps.

5.5.1 Modeling Individual Events

§ **868** First observations of SEP event related ozone decreases date back to the 1970s, in particular to the large event in August 1972. Paul Crutzen and coworkers [42] were the first to identify the reactions involved in this effect: basically, the ionization by precipitating charged particles leads to the formation of NO_x and HO_x . Both species are highly reactive. In particular, both destroy ozone. These observations led Crutzen conclude that nitrite oxides play an important role in ozone chemistry – this discovery earned him 1/3 of the nobel prize in 1995.

§ **869** While the qualitative description of the process is well established, its quantitative description suffers some problems. The observed quantities are, as indicated in Fig. 5.30, the energetic particle flux outside the atmosphere and magnetosphere on the one hand and the temporal/spatial variation of ozone in the atmosphere. The quantitative description of this process requires a sequence of three models:

- a model to understand the particle transfer through the geomagnetic field: SEPs are precipitating almost homogeneously onto the magnetosphere and then are either deflected by the magnetic field or allowed to precipitate down to the atmosphere. In a static magnetosphere, particle orbits can be calculated by integration of the equation of motion.

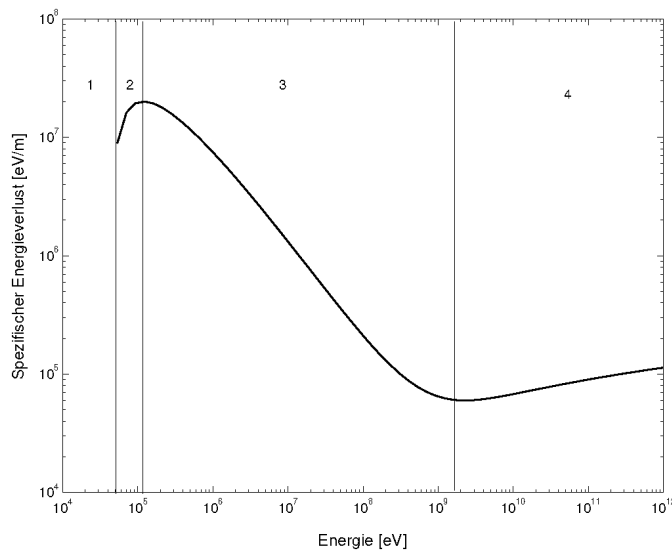


Abbildung 5.31: Specific energy loss according to the Bethe–Bloch equation for protons [189]

In a dynamic magnetosphere, the same approach can be used, although it is pretty time consuming.

The result of this model is a spatial pattern of precipitating particles on top of the atmosphere.

- a model to describe the ionization of the atmosphere by precipitating charged particles. This will be described in detail below.

The result of such a model is an ion–pair production rate in the atmosphere, depending on the horizontal coordinate (as inferred from the model magnetosphere above) and the vertical coordinate (depending on the energy spectrum of the precipitating particles).

- a model to describe the chemistry of the atmosphere. Such a model includes a large number of chemical reactions as well as some prescribed (or even self-consistently solved) transport and needs the ion–pair production rates as input.

The result is a 2D or 3D (depending on the dimensionality of the model atmosphere) ozone concentration that can be compared to the observations.

Thus the chain from observation 1 (SEPs in space) to observation 2 (ozone) leads through 3 models.

§ 870 For the present day magnetosphere, the horizontal pattern of precipitation and therefore also ion–pair production is simple: SEPs precipitate inside the polar cap but not outside.

§ 871 The vertical pattern of ion–pair production is regulated by the spectrum of the incident particles. The primary energy loss mechanism for charged protons in the energy range under study is ionization. Formally, this process is described by the Bethe–Bloch equation

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{e^4}{4\pi\epsilon_0^2 m_e} \frac{Z^2}{v^2} n_e \left[\ln \frac{2m_e v^2}{\langle E_B \rangle} - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right]. \quad (5.3)$$

The specific energy loss dE/dx is the energy dE deposited per unit path length dx along the particle track. It depends on (1) a number of constants (first fraction; the elementary charge e , the electron mass m_e and the absolute permeability ϵ_0), (2) the parameters of the incident particle (second fraction: charge Z and speed v), and (3) the electron density n_e of the absorber. The first term in the bracket contain the relative kinetic energy compared to the average bond energy $\langle E_B \rangle$ in the target material. The remaining terms are relativistic corrections with $\beta = v/c$.

§ 872 Figure 5.31 shows the specific energy loss depending on the particle energy for protons. The specific energy loss decreases with increasing particle energy (interval 3) because the

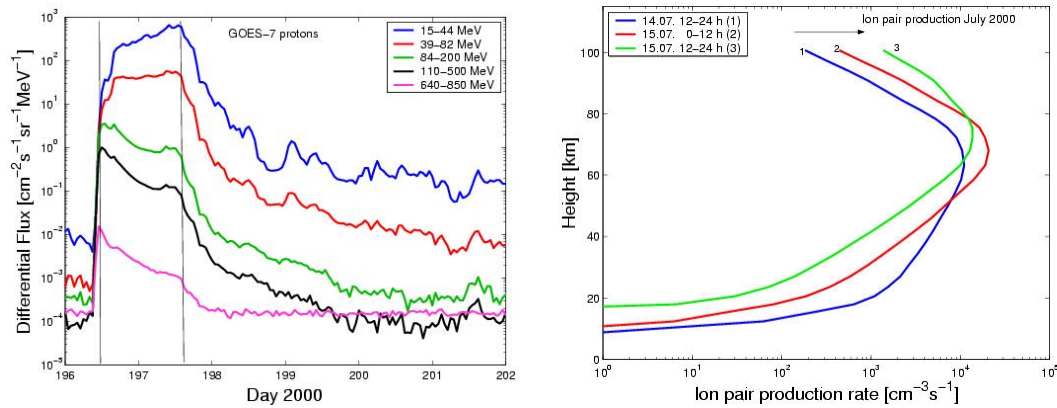


Abbildung 5.32: Bastille Day event: Particle intensities (left) and ionization rates (right) [189]

time for interaction decreases with increasing speed. dE/dx becomes minimum around the particles rest energy, afterwards it increases slightly due to relativistic effects (interval 4). Since this is a general behavior, Fig. 5.31 also can be applied to other particle species as long as the horizontal axis is scaled in units of the particle's rest energy (938 MeV in case of the proton) instead of its energy.

§ 873 The specific energy loss is maximum at low energies (interval 2). In consequence, the specific energy loss becomes largest close to the end of the particle's range. Thus the deposited energy as well as the resulting ion-pair production becomes maximum at the end of the range, the so-called Bragg peak. For very low energies (interval 1), the Bethe-Bloch equation is no longer valid: here the main physical processes are collisions between thermal particles and attachment of the electron to an ion. Both processes are not described by the Bethe-Bloch equation.

§ 874 The energy loss of a particle along its track can be calculated by numerical integration of (5.3). Figure 5.32 shows in its right panel the calculated ion-pair production rates (that is specific energy loss divided by average ionization energy) for three subsequent 12 h intervals, the first one starting at the time marked by the left horizontal line in the left panel. During this interval (blue curve), ion-pair production occurs down to about 15 km because particle energies are rather high (the magenta curve has already acquired its maximum while the blue curve still is rising). With increasing time (going from blue to red to green), the ion-pair production rate shifts to higher altitudes because the intensities at higher energies already are decreasing. In addition, ion-pair production at altitudes around 70 km is increased because the intensities in the lower proton energies (blue curve in the left panel) still are increasing.

§ 875 For the total model chain, these data now are fed into the model atmosphere. Figure 5.33 shows the modeled (left) and observed (right) NO_x production (top) and ozone depletion (bottom). Although the modeled results tend to overestimate both the NO_x production and the ozone depletion, the overall temporal and spatial pattern is reproduced quite well.

5.5.2 Monte Carlo Simulation of Atmospheric Ionization

§ 876 Sofar, we have used a direct numerical integration of (5.3). But that approach has two disadvantages. First of all, the Bethe-Bloch equation is an empirical law derived from observations at the ground, that is in a standard atmosphere. And secondly, it neither allows to track the secondary electrons correctly nor to calculate ionization rates for incident electrons. The reason for this is simple: if a proton ionizes an atom, the collision is between a heavy

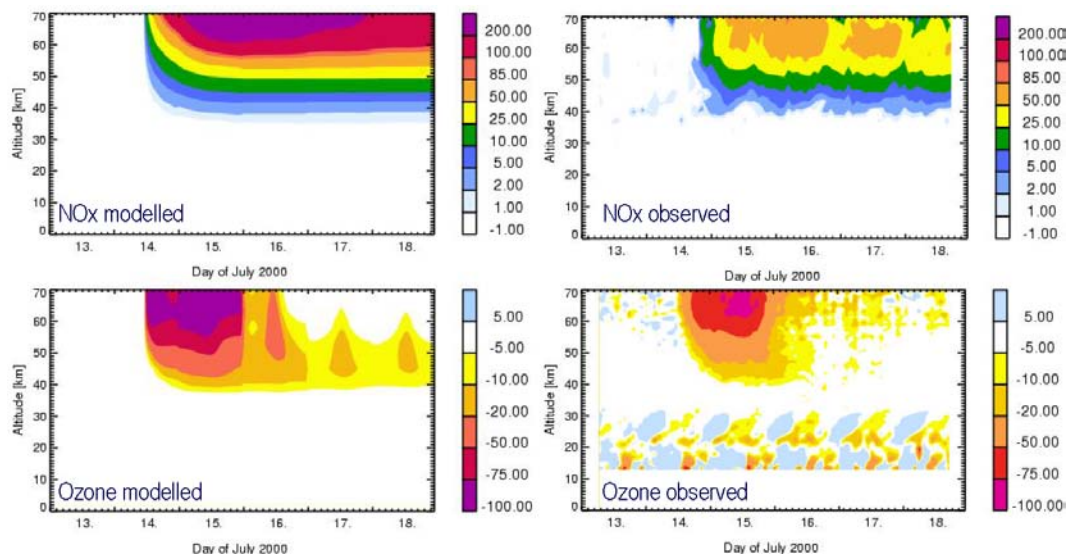


Abbildung 5.33: Bastille Day event: observed (right) and modeled (left) NO_x (top) production and ozone (bottom) depletion (M. Sinnhuber, U. Bremen, priv. comm.)

incident particle and the electron. Thus the primary particle is not deflected as it knocks the electron out of its orbit. In case of an incident electron, however, the collision partners have equal mass and the primary electron will be deflected from its path, too. As a consequence, it does not travel a straight line through matter but is subject to multiple scattering. While the Bethe–Bloch equation still gives a reasonable approach on the specific energy loss along the particle track, it does not allow to calculate the energy loss within a certain slab of target material. The same problem also holds for the secondary electron.

§ 877 To model the total inventory of precipitating particles, which in addition to protons also contains electrons and heavier nuclei, a different approach is required. Since the very nature of the ionization process is stochastic, a Monte Carlo simulation is a reasonable approach. Here we need a list of all physical processes and their relevant cross sections/probabilities and then follow the particle along its track in small steps. At the end of each step, the particle either experiences an interaction with the ambient medium or not. The probability for such an interaction directly depends on the interaction cross section. Such an approach allows the consideration of all possible interaction processes, as long as the energy-dependent cross sections are known. This allows also the tracking of electrons: in each interaction not only the energy loss is taken from an energy loss distribution function but also the angle of deflection can be taken from some distribution. And in addition to the simple process of ionization, we also can allow for processes such as the generation of bremsstrahlung and, provided the energy of the incident particle is large enough, pair production.

The Problem

§ 878 Before digging into too much detail, let us formulate the problem: the particle motion involves the following steps:

- during each time step, the particle is transported by a spatial step $\Delta s = v \Delta t$ with v being the particle speed. This almost corresponds to the advective term in a typical transport problem – it does not correspond to it exactly because in particular for electrons deviations from the direct travel path of the incident particle occur.
- at the end of each time step, a dice is thrown to decide whether the particle interacts with the matter or not. The likelihood of this process is determined by the total interaction cross section. If an interaction happens, a second throw of the dice determines the kind of

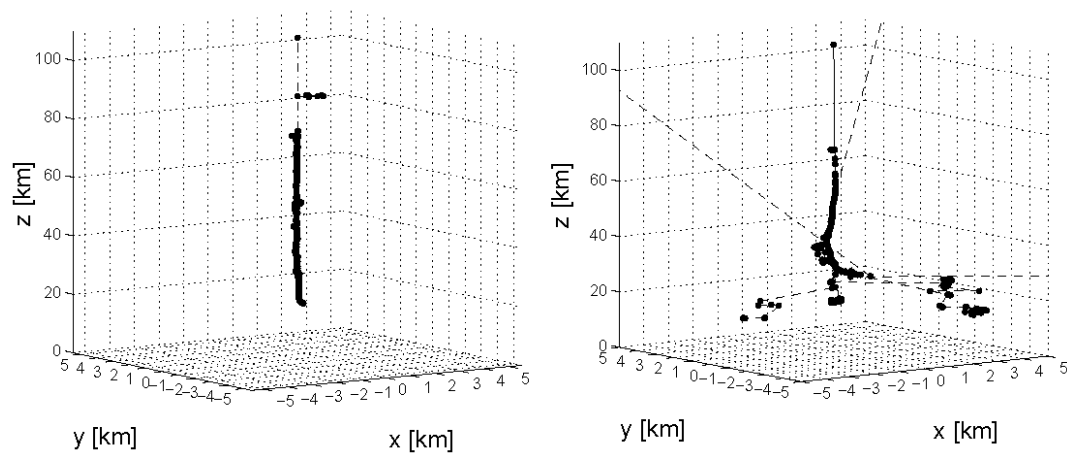


Abbildung 5.34: Monte Carlo simulation: Tracks of a 50 MeV electron (right) and a 300 MeV proton (left) in a model atmosphere [217]

interaction (for instance, ionization, hadronic interaction, production of Bremsstrahlung) depending on the relative interaction cross sections. In our simple model, we adhere to the Bethe–Bloch equation and the only energy loss mechanism is ionization. Thus the second throw of the dice can be omitted and the interaction cross section for ionization also becomes the total interaction cross section. If no interaction occurs, the next time step starts. If an interaction happens, we have to throw the dice again to determine the energy loss from the energy loss distribution. The particle properties (energy, eventually also direction of motion) will be updated and the particle’s energy loss is added as an energy gain to the volume. Alternatively, it is also possible to just count the ionization processes in each volume element (or along each line element of the travel path). If fast secondaries are produced, they are treated as additional particles and also have to be tracked by a Monte Carlo simulation.

The Model

§ 879 Our model atmosphere is plane-parallel because the height of the atmosphere is small compared to Earth’s radius. Up to a height of 100 km it is divided into 29 equidistant layers; its remaining mass is condensed into a 30th layer, 10 km thick: thus details of the energy deposit above 100 km are lost.

§ 880 The composition of the atmosphere is homogeneous with 23.3 wt% O₂, 75.5 wt% N₂ and 1.3 wt% Ar. For numerical studies, pressure, density and temperature height profiles are taken from the equatorial June atmosphere in the SLIMCAT/TOMCAT model [35]. This approach ignores the pronounced seasonal variability of the polar atmosphere and gives an average ionization profile instead [189]. For individual SEP events the corresponding polar atmosphere is used.

§ 881 During a SEP event protons, electrons, and α -particles are accelerated (for a recent summary see e.g. [119]). Electron to proton ratios as well as energy spectra depend on the parent flare, in particular whether it is impulsive or gradual, the properties of the coronal mass ejection, and the geometrical relation between observer and solar activity.

§ 882 Particle precipitation is assumed to be isotropic from the upper hemisphere: particle distributions in interplanetary space tend to be isotropic for electrons and become isotropic for protons during the time course of the event (e.g. examples in [122]). Observations by the MEPED (Medium Energy Proton and Electron Detector) instrument on board POES (Polar

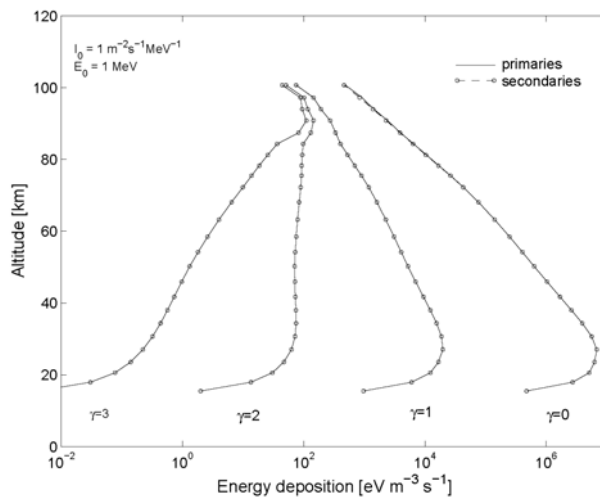


Abbildung 5.35: Energy losses of 1–500 MeV protons calculated with a Monte Carlo simulation (circles) and Bethe–Bloch (solid line) [217]

Orbiting Environmental Satellite) even suggest a slight preference for larger pitch angles inside the polar cap at altitudes of 900 km (Bornebusch, priv. comm.).

§ 883 Energy spectra of precipitating SEPs can be described by a broken power law [74, 61, 114]: $I(E) = I_0 \cdot (E/E_0)^{-\gamma}$ with I_0 being the differential intensity at a reference energy E_0 , E the energy, and γ the spectral index. Around some 100 MeV the spectrum flattens and intensities increase due to the background of galactic cosmic rays [71]. Observed spectra are fitted simultaneously by up to three power-laws; the breaks between the power laws are not at fixed energies but are determined such that the best fit over the entire spectrum results.

Monte Carlo Simulation

§ 884 GEANT 4 [3, 67] allows for a multitude of interactions between the precipitating particle and the absorber atmosphere. Our model considers as subset of particles protons, electrons, positrons, α s, and photons. Interactions are limited to electromagnetic ones: multiple scattering, Compton-scattering, ionization, photo electric effect, gamma conversion, annihilation, pair production, and production of bremsstrahlung. Secondaries produced in such interactions are tracked up to a cut-off length for particle propagation of 1 m. If particle energies are lower, the model switches to continuous energy loss.

§ 885 Precipitating particles have an angular distribution and an energy spectrum. The Monte-Carlo simulation itself is performed for mono-energetic pencil-beams of 100 particles; angles of incidence vary between 0° and 80° in steps of 10° . The energies range from 1 MeV to 500 MeV in 109 logarithmic equidistant steps for protons and 1 MeV to 50 MeV in 340 steps for electrons. Statistics are tested by increasing the number of incident particles by a factor of 10 – the results are essentially the same.

§ 886 The total energy input into each layer is the sum of the energy depositions of the individual particles; a division by the layer’s thickness yields the linear energy transfer (LET) dE/dx . Thus the primary result of the simulation is the LET as function of altitude, initial kinetic energy and impact angle.

§ 887 Ion pair production rates for individual particle events are obtained by folding the LETs with the observed particle spectrum and angular distribution and assuming an average ionization energy of 35 eV per ion pair [186].

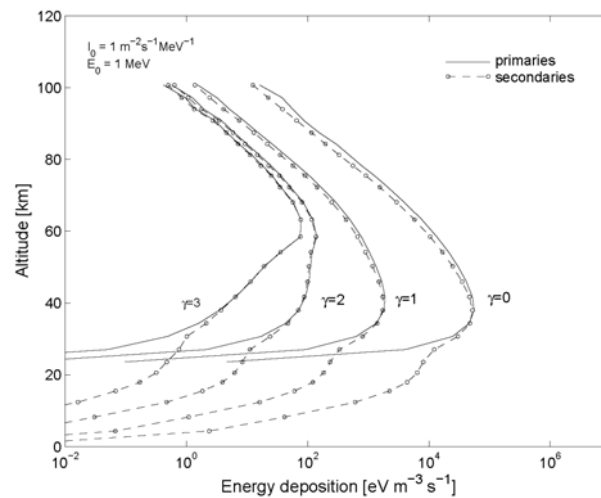


Abbildung 5.36: Energy losses of 1–50 MeV electrons calculated with a Monte Carlo simulation (circles) and Bethe–Bloch (solid line) [217]

Results

§ 888 Figure 5.34 shows sample tracks for a 300 MeV proton (left) and a 50 MeV electron (right). Production of secondaries is marked by dots, at the lines continuous energy losses occur with the line styles dashed, solid and dashed-dotted indicating neutral, negatively or positively charged particles, respectively.

§ 889 The proton trajectory basically is a straight line. Only in the extremely rarefied upper atmosphere a trace of a secondary electron with significant path length is visible. Such long tracks occasionally occur in the upper atmosphere, because a low density implies a small interaction probability between the secondary and the atmosphere, leading to a long track. At lower altitudes secondary electrons are quickly stopped by the dense atmosphere and do not show up as separate tracks.

§ 890 The straight path of the primary proton combined with the short range of the secondaries yields energy loss distributions comparable to those acquired in the conventional way without consideration of secondaries: Fig. 5.35 shows energy losses for particle spectra with four different power law indices γ with (dots) and without (line) consideration of the secondaries. With increasing γ the spectrum steepens and the ion production rate at lower altitudes decreases. Note that $\gamma = 0$ implies that the particle intensity is independent of energy while $\gamma = 2$ represents a SEP spectrum fairly well.

§ 891 The situation is quite different for electrons, see left hand side of Fig. 5.34: instead of a straight line the path is randomly twisted because the primary’s mass is the same as that of the shell electron and thus deflection occurs during interaction. This multiple scattering is not considered in a continuous loss model based on the Bethe–Bloch equation; thus such models underestimate the LET and consequently overestimates penetration depth. In addition, not all secondaries keep close to the track of the primary: aside from the secondary electrons produced during ionization, a primary electron also produces bremsstrahlung (dashed lines). These X-rays propagate large distances before depositing their energy due to Compton scattering and photoionization in denser layers of the atmosphere. Ionization thus can be shifted by several kilometers below the end of the primary track. The resulting energy transmission to altitudes less than 20 km with (dots) and without (lines) consideration of the secondaries is shown in Fig. 5.36, again for four different power law spectra and $\gamma = 2$ being a fair representative for SEP spectra.

§ 892 To demonstrate the implications of the Monte Carlo simulation for ion–pair production, two different events are analyzed: one prominent event (October 22, 1989) and for comparison a large impulsive event (June 14, 1989). Electron spectra in the range 0.5 to 2.5

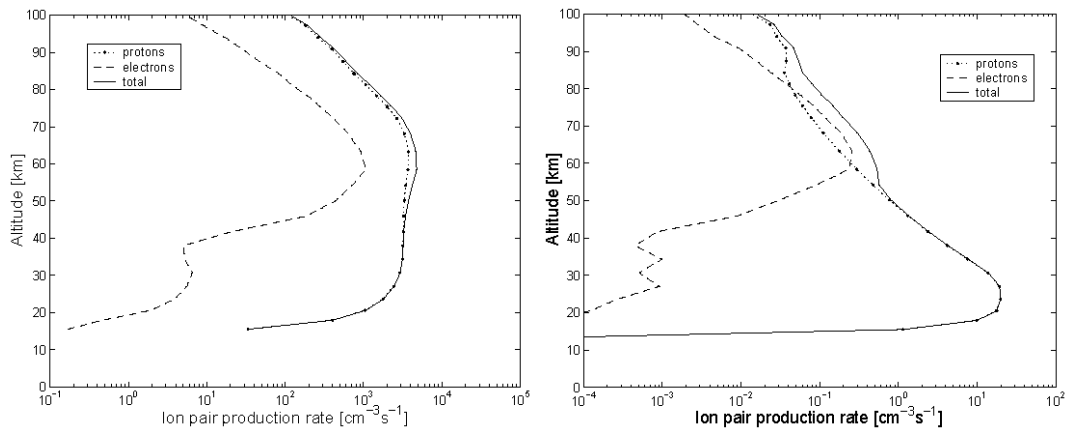


Abbildung 5.37: Ionization rates of electrons and protons combined for a gradual solar energetic particle event (left) and an impulsive one (right) [217]

MeV are obtained from the CPME (Charged Particle Measurement Experiment) on board IMP (Interplanetary Monitoring Platform). Comparison with the higher energy electron instrument on IMP shows that in both events the electron spectrum can be extended down to 5 MeV. For the June event, proton spectra in the range 0.29 MeV to 440 MeV are obtained from the same instrument; for the October event proton spectra in the range 0.8 MeV to 500 MeV were taken from GOES (Geostationary Operations Environmental Satellite) because IMP measurements are less reliable due to failure of the anticoincidence scintillator.

§ 893 The left hand side of Fig. 5.37 shows the modeled ion pair production rates for protons (dotted), electrons (dashed) and the sum of both (solid line) in the 4 October event for 6 hours containing the high energy maximum; at later times the instrument is saturated. Ionization of the electrons can amount to up to about 1/3 of that of protons in the height range 50 to 70 km, at lower altitudes electron contribution is insignificant – which is partly due to our abrupt cut off of the electron spectrum at 5 MeV.

§ 894 The ion pair production rates for the main phase (1 day) of the impulsive June event are shown on the right hand side of Fig. 5.37. Again the contribution of electrons is visible only above 50 km, however, around 70 km the ion pair production by electrons even exceeds that of the protons.

Conclusions

§ 895 The main results of the Monte Carlo simulation are:

R1 for 1 MeV to 500 MeV protons ionization rates are essentially the same in the Monte Carlo simulation and in a continuous energy loss model.

R2 for 1 MeV to 50 MeV electrons the consideration of bremsstrahlung shifts the ionization well beyond the Bragg peak to lower altitudes.

R3 electrons in SEP events contribute to ion pair production rates in the height range 50 to 70 km; the amount depends on whether the particle event originated in an impulsive or a gradual flare.

§ 896 As a consequence of **R1**, the consideration of secondaries in the Monte Carlo simulation cannot explain the difference between the observed and modeled electron densities in the October 1989 event as suggested by Verronen et al. [245]. Instead, **R3** suggests that the inclusion of electrons in the analysis of SEP events might explain such differences. It should be noted that implications of **R3** depend on the focus of research: in the very large events electron contributions are more or less a 10% effect and thus might be neglected as

suggested in [107]. For long term studies such as variations over the solar cycle or possible climate impacts, however, also the much larger number of electron-rich impulsive SEPs has to be considered and thus ionization rates (and atmospheric consequences of precipitating particles) can be evaluated only if also electrons are considered.

§ **897 R2** also has implications for modeling atmospheric effects of precipitating electrons. So far, magnetospheric electrons have been considered as a source of NO_x which, owing its long life-time, sinks down from the mesosphere into the stratosphere and affects ozone chemistry [31, 32]. Our results suggest a modification to their model in such that part of the ionization is directly transferred downwards by Bremsstrahlung. However, consequences are difficult to access since the produced NO_x and HO_x have different life times at different heights and thus implications for chemistry only can be evaluated in combination with a chemistry model – which is beyond the scope of this paper.

5.5.3 Applications of the Model

§ **898** In this section some results of our work on the consequences of solar energetic particles for atmospheric ionization and ozone depletion will be presented. The work is done in collaboration with Miriam Sinnhuber and Holger Winkler from the Institute of Environmental Physics at the University of Bremen.

Modeling of Atmospheric Consequences – Principle

§ **899** The question under study already is demonstrated in Fig. 5.30: what is the relation between solar energetic particles (left) and ozone depletion (right). Basically, the two figures present the information available: intensity–time profiles for different particle species and energies measured outside the atmosphere and ozone mixing ratios measured in the atmosphere above a certain height. Modeling consists of three modules:

- where do the particles precipitate? The geomagnetic field regulates the spatial pattern of particle precipitation such that it is limited to the polar cap (white ring in the left panel of Fig. 5.30 in the present day atmosphere). For a modified geomagnetic field such as during a field reversal, however, the spatial precipitation pattern has to be modeled.
- primary interaction: ionization. From the particle intensity–time profiles energy spectra are calculated and from them the vertical profile of energy losses in the atmosphere, such as shown in Fig. 5.32.
- from these ion–pair–production rates the generation of the chemically reactive components NO_x and HO_x is determined. From a chemistry model such as the one used at the University of Bremen, then ozone depletions can be calculated as shown and compared to the observations in Fig. 5.33.

Since three models stand between the observations, each model must be quite elaborate to avoid a sum-up of the unavoidable errors.

Individual Events

§ **900** Although modeling is performed with care, errors cannot be excluded. Thus extensive testing is required. However, atmospheric ozone is not only influenced by solar energetic particles but also by other factors such as the Sun’s hard electromagnetic radiation and atmospheric temperature and circulation patterns. Thus any variation in ozone at the time of a particle event can have many different sources – the particle event even might contribute nothing to the ozone variation.

§ **901** Thus the first task is to show the causal relation between ozone depletion and solar energetic particles and than to model it qualitatively. A reasonable approach might follow this line of thought: if solar energetic particles have any non-vanishing influence on the atmosphere, this should be most obvious in the largest events. This is also observed.

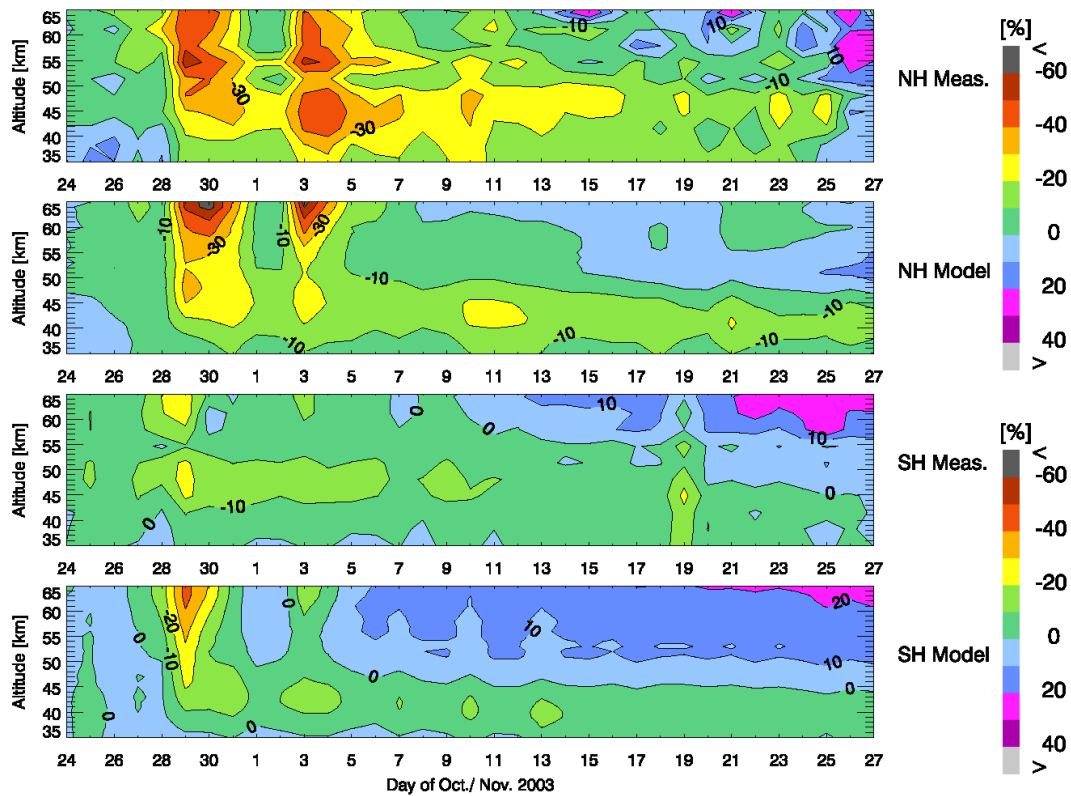


Abbildung 5.38: Ozone depletion following the series of large events in October/November 2003: modeled and observed ozone variations in the northern and southern hemisphere [205]

§ 902 In addition, the largest events provide the best test case for modeling: if the effect is large, its dilution due to natural variability is small. Thus a large solar particle event provides some kind of δ -stimulus for the atmosphere and its response can be analyzed despite all the natural noise underlying it. And solar energetic particle events can become quite large: in the Bastille day event in Fig. 5.30, particle intensities increase by up to 6 orders of magnitude above background thus providing a strong stimulus.

§ 903 As a consequence, large solar energetic particle events can be used to calibrate the model chain mentioned above before we attempt to derive more subtle effects from our models.

§ 904 To demonstrate the validity of the model chain, Fig. 5.38 shows comparisons between measurements by SCIAMACHY (top and third panel) and modeled (second and fourth panel) depletions in ozone following the large events in October/November 2003 for the northern (top panels) and southern (bottom panels) hemisphere. Spatial and temporal patterns in both hemispheres are reproduced quite reasonably, although as discussed before ozone depletion in the mesosphere is overrated while it is underestimated for late times in the stratosphere. However, these deviations between observations and model are small compared to the asymmetry between the two hemispheres: while both model and observations indicate a strong ozone depletion in the northern hemisphere, ozone variations in the southern hemisphere are almost negligible. Reasons for this asymmetry will be discussed below.

Long-Term Effects of Solar Energetic Particle Events

§ 905 While the modeling of the influence of individual particle events on ozone is a goal in itself, our interest is concerned more with longer times scales, in particular time scales

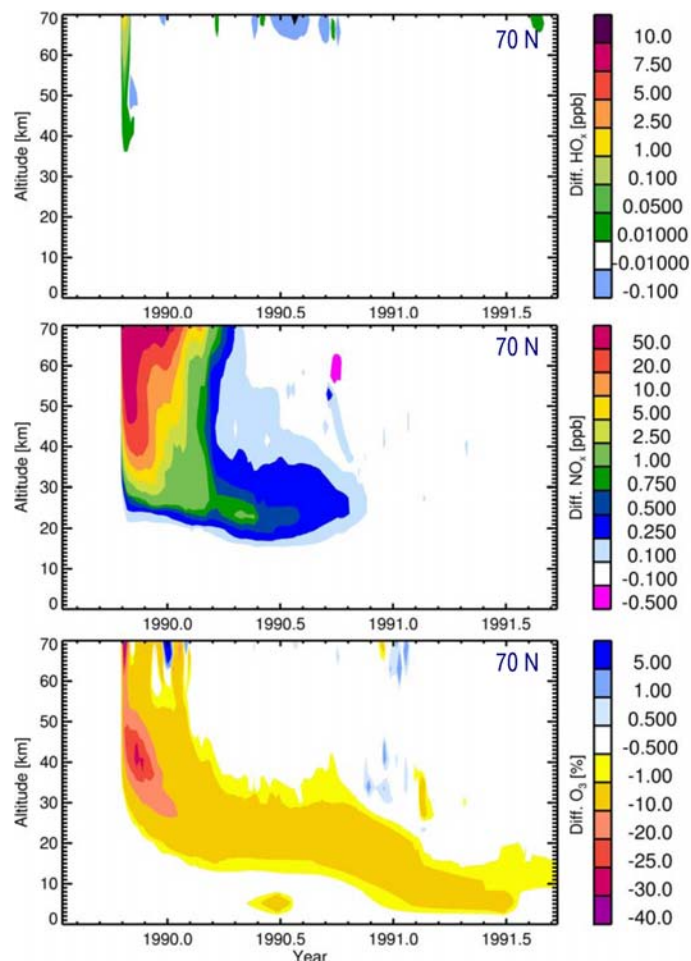


Abbildung 5.39: Consequences of the large October 1989 event in the atmosphere at N75: HO_x production (top), NO_x production (middle) and ozone depletion (bottom)

related to magnetic field reversals, variations of the terrestrial climate and variations of the atmosphere, in particular its composition.

§ 906 These long-term questions can be analyzed with different scopes. For instance, we can perform a single event analysis as described above only for modified boundary conditions. This would be a suitable approach to understand ozone depletion in individual events during, for instance, a magnetic field reversal or in a changing atmosphere. However, since magnetic field reversals also are accompanied by climate change and mass extinction, we also might ask whether ozone depletion might lead to climate change. Since large solar energetic particle events are rather rare (a few per solar cycle), such speculation only can be reasonable if a single event has a sufficiently long influence on the atmosphere and thus the effects from events might overlap and amplify in time.

§ 907 Figure 5.39 shows atmospheric consequences following the large solar energetic particle event in October 1989. The top panel shows vertical profiles of the HO_x generation at 70°N, the middle panel the same for NO_x. Both species are highly reactive and lead to ozone destruction. HO_x is produced mainly at altitudes above 40 km. It is a short lived species and is easily destroyed by photochemical reactions and during the ozone depletion reaction. Thus HO_x production during a solar energetic particle event certainly will not cause any long-term effects. The situation is different in case of NO_x: it is produced over a much broader height range from about 20 km to the mesosphere, although the maximum production occurs above about 40 km. The fundamental difference compared to HO_x is the live-time: particle precipitation is limited to a few days while high NO_x levels persist for weeks to months. With

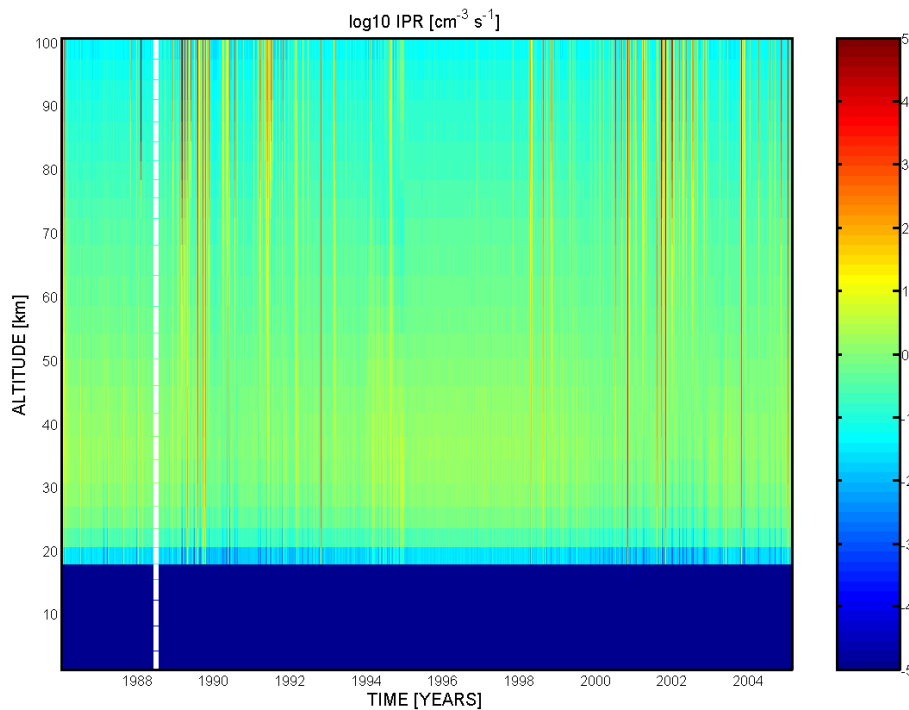


Abbildung 5.40: Ion-pair production due to energetic charged particles during the solar cycle

time, NO_x is depleted in the mesosphere by photochemical reactions – its life time in the stratosphere is much longer and with time it sinks slowly to lower altitudes with its maximum around the height of the ozone layer.

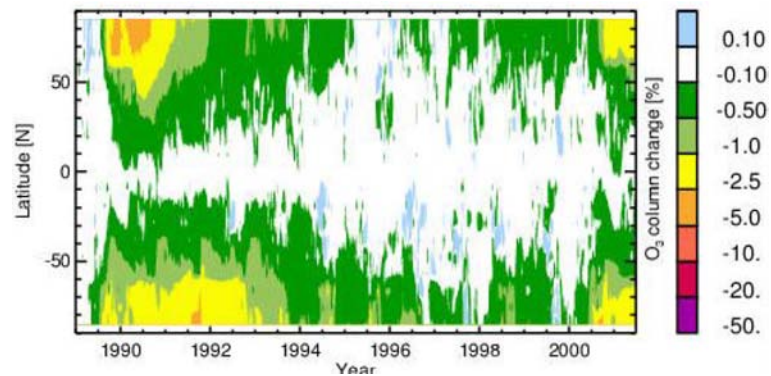
§ 908 Ozone depletion (bottom panel in Fig. 5.39) is regulated by both species: initially in the event there is a strong depletion in the mesosphere above 60 km due to the combined effects of HO_x and NO_x . The pronounced depletion around 40 km, on the other hand, is due to NO_x as can be inferred from the long time scales. Owing to different temperatures, the NO_x -induced ozone depletion is larger in the stratosphere than in the mesosphere. The most remarkable effect, however, is the persistent ozone depletion by a few percent right in the middle of the ozone layer around 25 km lasting for more than a year. Such a persistent anomaly bears the seed for possible cumulative effects of solar energetic particle events – in particular during magnetic field reversals where the effects of individual events will be even larger than in the present day atmosphere.

Ionization through the Solar Cycle

§ 909 The first approach on long-term studies is a view on the solar cycle. Figure 5.40 shows ion-pair production rates from 1988 to 2005, that is almost 2 solar cycles. Times of high solar activity are clearly visible as times with increased ion-pair production rates between 1989 and 1992 and again between 2000 and 2005. Solar minimum is around 1996. The sharp drop in ionization rate at 20 km is ‘instrumental’: the highest energies observed by the GOES particle detector are 800 MeV protons which stop at that height. At lower altitudes, ionization expected from higher energies is ignored in this figure – this does not pose a problem for modeling because the subsequent atmospheric chemistry model is limited to the stratosphere and mesosphere and thus is not influenced by neglect of tropospheric ionization.¹⁴

¹⁴Such a limitation for a chemistry module is validated by the fact that the tropopause is a boundary which strongly inhibits transport of matter and thus almost completely decouples the troposphere from the atmosphere above.

Abbildung 5.41:
Changes total ozone
due to precipitating
solar energetic particles
during the solar cycle
(courtesy M. Sinnhuber,
U. Bremen)



§ 910 Figure 5.41 shows the variation in total ozone from 1989 to the middle of 2001, that is one solar cycle. The figure shows a couple of remarkable features:

- the general temporal behavior of the ozone depletion reflects the variation of ion pair production rates with the solar cycle as shown in Fig. 5.40: pronounced ozone depletion is observed between 1989 and 1992 and after 1999; the minimum is around 1996.
- to the left, at the end of 1989, a strong decrease in ozone of some percent is visible in the northern hemisphere. This is related to the large solar energetic particle of October 1989 as discussed in connection with Fig. 5.39. As mentioned there, the effect lasts for some month.
- the ozone depletion on the right (middle of 2000) is related to the Bastille day event discussed in connection with Fig. 5.30.
- in particular for the October 1989 event a strong hemispherical asymmetry is visible: the ozone depletion is much more pronounced on the northern hemisphere than on the southern one. In contrast, late in 1991 a solar energetic particle event causes an ozone depletion in the southern hemisphere but has almost no influence on the northern hemisphere. This hemispheric asymmetry basically is caused by two effects: (a) HO_x and NO_x life-times are influenced by photochemical processes as are many other chemical processes in the atmosphere. Thus even if all other conditions are equal, both hemispheres might exhibit different patterns of ozone depletion because one is more strongly illuminated than the other one. In the most extreme case, one hemisphere might be in polar night while the other is in polar day. (b) Circulation patterns are very different in both hemispheres: while in the northern hemisphere meridional transport happens all the year, in the southern hemisphere a strong closed vortex persists in the stratosphere that inhibits meridional transport, in particular in winter. In consequence, stratospheric temperatures can be extremely low which influences ozone chemistry. This vortex also explains why an ozone hole is observed at the southern pole while the northern hemisphere ozone hole is rather rudimentary.
- the spatial pattern of ozone depletion varies with the solar cycle: while during solar maximum ozone depletion due to precipitating particles occurs almost down to the equator, during solar minimum ozone depletion is limited to latitudes poleward of about 60° .
- ozone depletion occurs at latitudes where no particles precipitate: owing to the shape of the geomagnetic field, particle precipitation is limited to the polar cap, that is to geographic latitudes well polewards of 60° . Ozone depletion is not limited to these high latitudes but occurs also close to the equator. This shift reflects the atmospheric circulation patterns and the spatial variation in ozone production: the main ozone production is at low altitudes, leading to high ozone concentrations at low altitudes, see also the right panel in Fig. 5.30. The ozone-rich air then is transported polewards at high altitudes. At high latitudes ozone is destroyed by photochemical reactions as well as energetic particles. The equation of continuity requires also transport from the pole to low latitudes. This advects ozone depleted air to equatorial latitudes and thus explains the reduction in equatorial ozone.
- in mid-latitudes (around 50°) the solar-cycle variation in ozone due to precipitating energetic particles is comparable to the observed variation – and it is opposite in sign to the

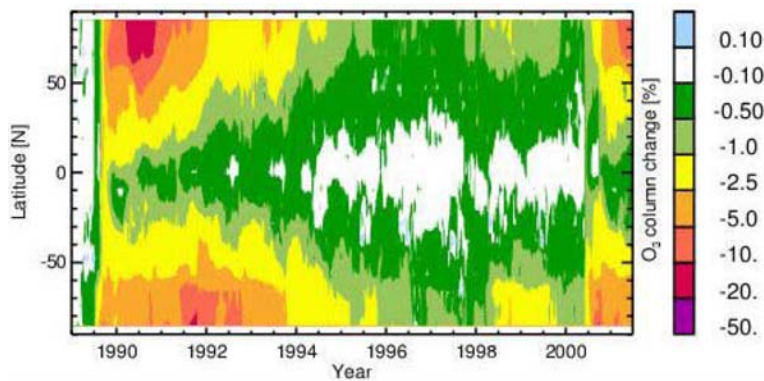


Abbildung 5.42:
Variation in total ozone during the solar cycle without geomagnetic field (courtesy M. Sinnhuber, U Bremen)

variation expected from the solar-cycle variation of the UV radiation.

Vanishing Geomagnetic Field

§ 911 A worst case estimate for the ozone balance during a magnetic field reversal is obtained in case of a vanishing geomagnetic field. Then particles precipitate into the atmosphere at all latitudes and not only at high latitudes. Figure 5.42 shows model calculations for this case. The results are quite similar to the ones obtained for the present day geomagnetic field in Fig. 5.41:

- total ozone depletion is higher during solar maximum than during solar minimum,
- the effects of individual events are visible,
- ozone depletion in individual events shows a hemispheric asymmetry,
- the spatial pattern of ozone depletion varies with the solar cycle.

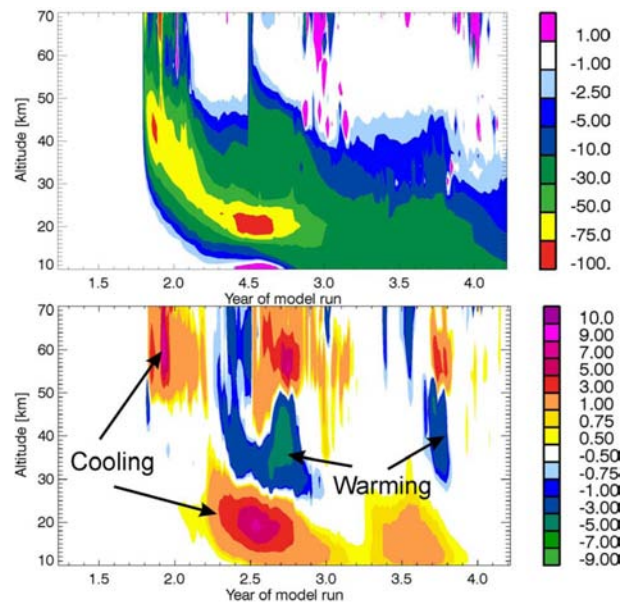
Despite all these similarities (in fact, there is one similarity too much) there is also a fundamental and surprising difference between the two figures: ozone depletion in high latitudes is much more pronounced in case of a vanishing geomagnetic field although the number of particles precipitating at high latitudes does not change! The difference in particle precipitation between the present-day field and the vanishing field, on the other hand, occurs at low- and mid-latitudes: here the difference in ozone depletion between the two runs is less pronounced than at polar latitudes where no difference would be expected. This again reflects the complex relation between photochemical processes and atmospheric circulation.

§ 912 A closer inspection of Fig. 5.42 suggests ozone depletion by 10–20% at high latitudes lasting for a few months. Ozone has radiative properties, in particular, it absorbs UV radiation and is also a greenhouse gas, that is, it affects the terrestrial long-wave emission. In consequence, a local change in ozone concentration can cause a local change in temperature. Since pressure gradients resulting from temperature gradients are the driving forces for atmospheric motion, a change in ozone concentration might cause a change in atmospheric velocity fields and thus modify climate.

Consequences for Climate?

§ 913 A first indication for such a process is given in Fig. 5.43: in the top panel ozone depletion at 75N is shown for a large solar energetic particle event at the time of polarity reversal, that is for a vanishing geomagnetic field. Ozone depletion can amount to more than 50% in the stratosphere and stay at such high levels for almost a year. The lower panel in Fig. 5.43 shows the resulting changes in temperature (sorry for the color-coding). Although temperature changes are rather small (rarely larger than 5 K), temperature gradients can become quite large. In consequence, wind fields change. And once the wind fields are modified, the entire temperature distribution in the atmosphere is modified, which certainly will affect climate.

Abbildung 5.43: variation in ozone (top) and temperature (bottom) at 75N following a large solar energetic particle event during a magnetic field reversal (based on [226])



§ 914 The simulation in Fig. 5.43 can be regarded as a first indication for a solar energetic particle induced modification of the climate. The model atmosphere used to obtain that result has been build primarily for the study of atmospheric chemistry. The model is a 2D model only, that is it considers the vertical coordinate and latitude as horizontal coordinate because the relevant transport processes in the atmosphere are meridional. In consequence, atmospheric circulation can not be treated self-consistently. Instead, it is parameterized such that only the meridional component is allowed to vary while the azimuthal transport is fixed. Such a model cannot adjust completely to a different temperature pattern driving the circulation systems. Thus the results in Fig. 5.43 give an indication only.

§ 915 Within the framework of CAWSES it is planned to use the MPI Hamburg model HAMMONIA (<http://www.mpimet.mpg.de/en/depts/dep1/uma/hammonia/>) to model possible consequences of precipitating solar energetic particles for climate in more detail. It should be noted that this implies a large amount of computational resources. Thus the simple first estimate in Fig. 5.43 has been relevant in such that it has confirmed that the process under study is possible and worth further investigation. Without such a preliminary study it would have been irresponsible to start the study with the full climate model.

Kapitel 6

Kommunikation

The fundamental problem of communication is that of reproducing at one point either exactly or approximately a message selected at another point.

Claude Shannon [222]

§ 916 Die Kommunikation zwischen einem Satelliten und seiner Bodenstation zerfällt in zwei Bereiche: (a) operationale Daten und (b) Nutzdaten. Die operationalen Daten umfassen im Downlink die Vitalparameter des Satelliten, wie Temperaturen, Lage, Stromversorgung und Position, sowie von Seite der Bodenstation im Uplink die Befehle zur Lagekontrolle, zum An- und Ausschalten von Instrumenten, zum Senden der Daten usw. Operationale Daten müssen in Echtzeit und ohne Fehler transmittiert werden, die zu sendenden Datenmengen sind gering. Der größte Teil der Kommunikation ist einseitig, das Senden der Nutzdaten vom Satelliten zum Boden (Downlink). Hierbei fallen sehr große Datenmengen an, die möglichst fehlerfrei versendet werden sollen, aber in der Regel nicht notwendigerweise in Echtzeit – was dann jedoch Datenspeicher erfordert.

§ 917 Der Schwerpunkt dieses Kapitel liegt auf der Übermittlung von Daten über unsichere Kommunikationskanäle mit geringer Datenübertragungskapazität; die wichtigsten Themenbereiche sind Datenreduktion bzw. Kompression und Platz sparende Kodierung der Daten, bei der gleichzeitig eine Fehlererkennung und möglichst auch -korrektur gegeben ist.

6.1 Historisches

§ 918 Bei interplanetaren Missionen und Missionen zu anderen Planeten wurden und werden die Messverfahren so gewählt, dass die Daten in digitalisierter Form vorliegen und damit direkt an die Bodenstation übermittelt werden können – alles andere wäre ohnehin nicht möglich.¹ Dadurch ist bei den frühen Missionen die Qualität des Datenendprodukts begrenzt; zum einen durch die geringe Datenübertragungsrate, zum anderen durch die Notwendigkeit, Instrumente zu verwenden, die elektronische Daten produzieren obwohl diese nicht zwingend die besten sein müssen (vgl. Videokamera und konventionelle Kamera wie in Abschn. 3.2.7 diskutiert).

¹Eine Ausnahme ist natürlich der Sample Return. Das ist aber korrekterweise kein Remote Sensing sondern eine in-situ Messung: die Probe wird in-situ genommen, lediglich die Analyse erfolgt an anderem Ort. Sample Return ist selten: die Lunar Return Samples wurden größtenteils bei bemannten Missionen mit zurück gebracht; aus dem Sonnenwind hat Genesis gesampelt und dann statt der geplanten Auffanglandung einen etwas harten Aufpraller hingelegt.

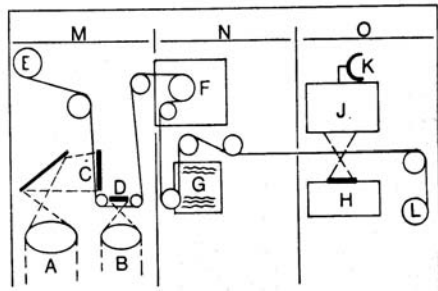


Abbildung 6.3: Die Daten werden weiterhin mit Film und Kamera gewonnen, der Film wird an Bord des Satelliten entwickelt und gescannt und die so gewonnenen digitalen Daten werden transmittiert [49]

§ 921 Bevor Sie die große Zahl von sowjetischen Satelliten als übersteigertes Informationsbedürfnis fehlinterpretieren, sollten Sie einen Blick auf deren Verfahren werden. Die sowjetische Variante war im Prinzip nicht sehr verschieden von der amerikanischen, lediglich wurde nicht nur der Film sondern der ganze Satellit rückgeführt: da die UdSSR zwar über ausgedehnte Landflächen verfügt jedoch mehr Schwierigkeiten mit dem gesicherten Zugang zu den Ozeanen hatte, wurden die Filme nicht in Kapseln abgeworfen sondern der Satellit kontrolliert zum Absturz gebracht.³ Die durch die Rückführung des Filmmaterials bedingten kurzen Lebensdauern der Satelliten sind in Abb. 6.2 zu erkennen. Die Abbildung stammt übrigens nicht aus der Frühzeit der Erdfernerkundung sondern bezieht sich auf das Jahre 1980; die Zahlen über die Starts lassen sich an Hand des SpaceWarn Bulletins [615] nachvollziehen. Aus dem Vergleich von KH's der USA und den Kosmos der UdSSR wird deutlich, dass beide Blöcke unterschiedliche Konzepte verfolgt haben: die UdSSR hat, eigentlich ganz modern, den billigen Einmal- oder Wegwerfsatelliten bevorzugt, die USA dagegen ein langlebiges Produkt. Dadurch ließen sich auch aufwendigere Instrumente fliegen – die abzuwerfende Filmbüchse war aber bis in die Mitte der 1980er dabei. Resurs (siehe auch § 302) hat dieses Verfahren sogar bis in die 1990er hinein gerettet.

6.1.2 Onboard-Scans

§ 922 Beide Verfahren, Abwurf der Filmkapsel und kontrollierter Absturz des Satelliten, sind nicht nur material- und kostenintensiv sondern haben einen weiteren Nachteil, der für die Militärs noch wesentlich gravierender ist als für zivile Nutzer: Echtzeit-Aufklärung ist mit dieser Methode der Datenrückführung nicht möglich.

§ 923 Auf Grund der hohen Qualität der photographischen Aufnahmen hat man daher im militärischen Bereich relativ früh ein hybrides Verfahren entwickelt: die eigentliche Aufnahme (der Sensor) erfolgt weiterhin analog (Kamera und Film), die Datenübertragung dagegen digital. Voraussetzung dafür ist die Umwandlung des analogen Signals in ein elektronisches Signal an Bord des Satelliten.

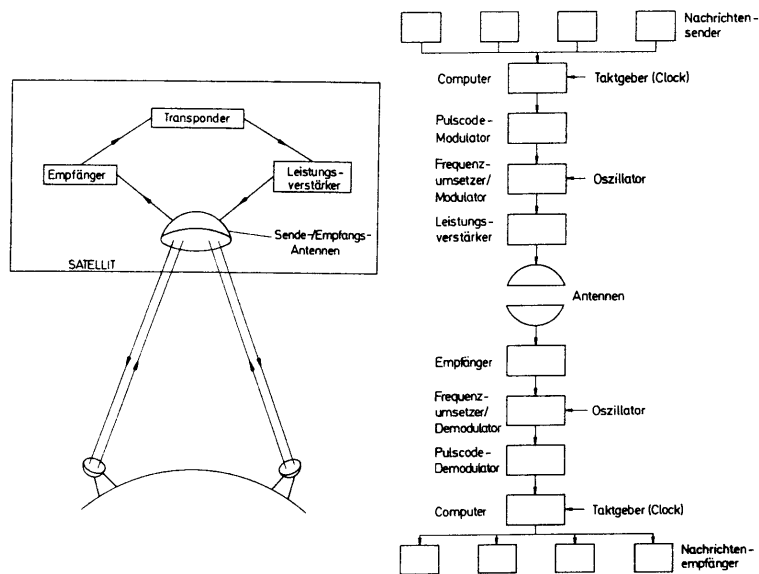
§ 924 Dazu wurde das in Abb. 6.3 dargestellte Verfahren entwickelt: der Film wird an Bord des Satelliten entwickelt und anschließend gescannt. Auf diese Weise liegt die Information in digitalisierter Form vor und kann zur Bodenstation transmittiert werden. Damit ist nahezu Echtzeit-Aufklärung möglich, allerdings ist die Datenqualität schlechter als die des Originalfilms; bei Bedarf kann der Film weiterhin mit der Kapsel zurück geführt wurde. Die Idee der selektiven Bildrückführung haben wir auch beim Waldbrandsatelliten in § 49 diskutiert – allerdings ohne Verwendung des Films sondern mit modernen Sensoren.

6.1.3 Technische Anmerkungen

§ 925 Heutige Erdfernerkundungssatelliten erzeugen nur noch digitale Daten, die transmittiert werden – Film wird außer auf Resurs nur noch auf dem Space Shuttle bzw. der ISS

³Da militärische Erdfernerkundungssatelliten in sehr geringen Höhen fliegen, ist ihre Lebenszeit ohnehin nur gering, d.h. der Satellit muss nicht einmal zum Absturz gebracht werden sondern es muss nur sein Absturz kontrolliert werden.

Abbildung 6.4: Nachrichtenstrecke bei Nachrichtensatelliten (links) und Blockdiagramm einer typischen Telemetrie-/Telekommando-Strecke (rechts, [200])



verwendet. Die technischen Probleme bei der Kommunikation mit Satelliten lassen sich daher reduzieren auf die Punkte:

- die anfallenden Datenmengen sind groß, die Übertragungsraten dagegen klein; als Beispiel fallen auf TerraSat alleine fürs Radar 830 Mbits/s an während die Übertragungsrates für den Satelliten insgesamt nur 320 Mbit/s beträgt. Damit ergibt sich die Notwendigkeit der Datenkompression (Quellencodierung).
- die Kommunikationskanäle sind gestört, z.B. Störungen der atmosphärischen Ionisation durch solare Eruptionen, Dämpfung in der Troposphäre durch starken Regen oder hohen Wasserdampfgehalt). Damit ergibt sich die Notwendigkeit, die Daten so zu codieren, dass eine Fehlererkennung und gegebenenfalls -korrektur möglich wird (Kanalcodierung).
- Verfügbarkeit einer Boden- oder Relais-Station oder gegebenenfalls Datenspeicherung.

§ 926 Der Schwerpunkt dieses Kapitels wird in den Bereichen Datenkompression und Codierung mit Fehlererkennung und -beseitigung liegen.

6.2 Kommunikation und Information

§ 927 Kommunikation lässt sich definieren als der Austausch von Information zwischen Systemen, Teilsystemen und Systemelementen, die in der Lage sind, Informationen zu erzeugen, aufzunehmen, zu verarbeiten und zu speichern. Ein wesentlicher Bestandteil der Kommunikation ist also der Umgang mit Information. Daher ist es sinnvoll, sich mit den Grundlagen der Informationstheorie zu beschäftigen, bevor wir zu den Details der Kommunikation übergehen. Doch zu Beginn einige Grundbegriffe. Dies ist wichtig, da einige umgangssprachliche Bedeutungen nicht vollständig mit der informationstheoretischen Definition der Begriffe in Einklang stehen.

6.2.1 Kommunikation

§ 928 Beginnen wir dazu mit dem Begriff der Kommunikation. Bei Kommunikation handelt es sich, wie bereits festgestellt, um die Übertragung von Information. Dieser Informationsaustausch kann auf zwei prinzipiell unterschiedliche Weisen erfolgen:

1. Passive Übertragung von Information (z.B. Kommunikationssatelliten, Telefon, Fernsehen, TDRS: Tracking and Data Relay System [430]): Hierbei wirkt der übertragende Satellit als Relaisstation, interpretiert die Signale aber nicht, sondern empfängt sie und

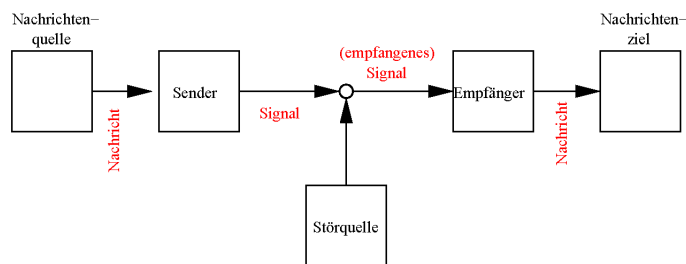


Abbildung 6.5: Kommunikationssystem, basierend auf [224]

sendet sie nach einer Frequenzumsetzung an eine andere Station zurück (vgl. Abb. 6.4, links). Diese Frequenzumsetzung mittels eines Transponders ist notwendig, damit die Empfangsdaten trotz des großen Pegelunterschiedes zu den Sendedaten vom Satelliten einwandfrei empfangen werden können. Ein wesentlich einfacheres Beispiel waren die Echo-Ballon-Satelliten [491, 402], bei denen die Signale lediglich passiv vom Satelliten reflektiert wurden (also ohne Frequenzumsetzung und Verstärkung).

2. Datenübertragung (z.B. Messdaten von Instrumenten ebenso wie Telekommandos an Satelliten, vgl. Abb 6.4, rechts), beides setzt Ver- und Entschlüsselung von Informationen voraus.

§ 929 Die passive Übertragung ist eine rein technische Frage. Die die Information übertragenden Satelliten werden zwar als Kommunikationssatelliten bezeichnet, sie nehmen jedoch im eigentlichen Sinne gar nicht an der Kommunikation teil, da sie den Inhalt der zu übertragenden Information nicht erkennen, sondern nur kopieren. Im informationstheoretischen Kontext sind Kommunikationssatelliten lediglich ein Bestandteil des Übertragungskanals (s.u.).

§ 930 Zum besseren Verständnis dieser Aussage ist in Abb. 6.5 ein Kommunikationssystem symbolisch dargestellt. Die Grundbestandteile eines Kommunikationssystems sind eine Nachrichtenquelle, ein Übertragungskanal und eine Nachrichtensenke. Nachrichtenquelle und -senke werden mit den Mitteln der Informationstheorie beschrieben, wobei die ursprüngliche Nachricht vor der Abgabe an den Sender bzw. nach dem Auffangen durch den Empfänger noch codiert bzw. decodiert werden kann (Quellencodierung). Der Übertragungskanal selbst sollte die Nachricht unmodifiziert weitergeben, hier führen jedoch Störquellen zu einer Modifikation. Um die durch diese Störquellen bewirkten unsystematischen Änderungen der Nachricht zu identifizieren und die Fehler teilweise sogar wieder zu kompensieren, verwendet man spezielle Codierungsverfahren (Kanalcodierung, siehe Abschn. 6.4).

§ 931 Betrachten wir das Kommunikationssystem in Abb. 6.5, so können wir daran sofort die Fragen verdeutlichen, die wir in den folgenden beiden Kapiteln behandeln werden:

- Was ist Information? Wie misst man den Betrag der Information?
- Wie misst man die Kapazität eines Übertragungskanals?
- Die Übersetzung der Nachricht in das Signal durch den Sender beinhaltet eine Codierung. Was sind die charakteristischen Merkmale einer effizienten Codierung? Und wenn die Codierung so effizient wie möglich ist, mit welcher Übertragungsrate kann der Kanal Informationen weiterleiten?
- Was sind die allgemeinen Merkmale der Störungen? Wie beeinflussen diese Störungen die Genauigkeit der Nachricht, die schließlich das Ziel erreicht? Wie kann man die unerwünschten Effekte der Störungen auf ein Minimum beschränken und bis zu welchem Grad können sie ausgeschaltet werden?
- Wenn das zu übertragene Signal kontinuierlich ist (z.B. Musik) und nicht aus diskreten Zeichen besteht, wie beeinflusst diese Tatsache das Problem?

§ 932 Bisher haben wir Kommunikation eher unter dem technischen Aspekt betrachtet. Eine vollständige Beschreibung der Kommunikation muss jedoch alle drei Ebenen der Kommunikation berücksichtigen [224]:

- (A) Wie genau können die Zeichen der Kommunikation übertragen werden (technisches Problem)?
- (B) Wie genau entsprechen die übertragenen Zeichen der gewünschten Bedeutung (semantisches Problem)?
- (C) Wie effektiv beeinflusst die empfangene Nachricht das Verhalten des Empfängers in der gewünschten Weise (Effektivitätsproblem)?

Die technische Ebene (A) wird in den folgenden Abschnitten erläutert werden.

§ 933 Das semantische Problem betrifft die Übereinstimmung der Interpretation der Nachricht beim Empfänger verglichen mit der Bedeutung, die der Sender der Nachricht geben wollte. Selbst in dem alltäglichen Problem der Kommunikation durch Sprache kann dies zu verwickelten Situationen und Missverständnissen führen. Shannon und Weaver [224] illustrieren diesen Punkt mit Hilfe der Personen X und Y: Wenn X nicht zu verstehen scheint, was Y sagt, so ist es theoretisch nicht möglich, dass diese Situation, solange Y weiterhin nur mit X redet, geklärt werden kann. Wenn Y fragt, ‘Verstehen Sie mich jetzt?’ und X erwidert ‘Ja, natürlich’, so ist das nicht unbedingt ein Beweis dafür, dass die Verständigung erreicht wurde. Es kann ja sein, dass X die Frage nicht verstanden hat. Falls das so lächerlich klingt, stellen Sie sich folgenden Dialog vor: ‘Czy pañ mnie rozumie?’ mit der Antwort ‘Hai wakkate imasu.’

§ 934 Das Effektivitätsproblem ist in einem gewissen Sinne mit dem semantischen Problem verbunden. Grundsätzlich handelt es sich dabei um die Frage nach dem Erfolg, mit dem eine vom Empfänger erhaltene Nachricht sein Verhalten in der vom Sender gewünschten Weise beeinflusst. Auf den ersten Blick mag die Annahme, der einzige Zweck der Kommunikation sei es, das Verhalten des Empfängers zu beeinflussen, als eine unerwünschte Beschränkung erscheinen. Mit einer einigermaßen weiten Auslegung des Begriffes Verhalten ist es jedoch klar, dass Kommunikation entweder das Verhalten beeinflusst oder aber ohne irgendeine ersichtliche Wirkung bleibt.

§ 935 Beginnen wir jetzt aber mit der Diskussion unseres in Abb. 6.5 dargestellten Kommunikationssystems und wenden uns als erstes der Frage zu, was Information ist und wie sie sich darstellen lässt.

6.2.2 Was ist Information?

§ 936 Die Organismen und Systeme, die unsere Umwelt bilden, stehen in einem dauernden Austausch miteinander. Offensichtlich und schon lange bekannt und beschrieben ist der Austausch von Materie und Energie. Eine dritte Art des Austausches besteht im Austausch von Nachrichten oder Information. Solche Nachrichten können Reize, Befehle, Fragen, Antworten, Beobachtungen, Behauptungen usw. sein [84].

§ 937 Der Begriff der Information ist auch in der normalen Umgangssprache vorhanden. Eine mit seiner gewohnten Interpretation in Einklang stehende Definition ist im folgenden in drei verschiedenen Formulierungen wiedergegeben [136]:

- Information ist das, was wir nicht wissen.
- Information ist die Eigenschaft einer Nachricht, beim Empfänger Kenntniszuwachs zu erzeugen.
- Information ist Wissenszuwachs oder Abbau von Unsicherheit über einen interessierenden Sachverhalt.

§ 938 Information hat also den Charakter von etwas Unbekanntem oder Unerwartetem. Alles, was wir bereits wissen, enthält keine Information mehr. Hierbei ist nur der Aspekt des Unbekannten wichtig, nicht die ‘Inhaltsschwere’ oder Bedeutsamkeit der Nachricht. Damit enthält die Nachricht ‘Die Kuh XYZ auf der Alm QRS hat heute gekalbt’ den gleichen Informationsgehalt wie ‘Sie haben den Jackpott mit 42 Mio. DM geknackt’. Die Nachricht



Abbildung 6.6: Ungestörter Informationskanal

‘Irgendwo auf der Welt hat heute irgendeine beliebige Kuh gekalbt’ hat dagegen einen Informationsgehalt von Null: zwar irritiert mich die Meldung vielleicht, da ich nicht weiß, was ich mit ihr anfangen soll. Die Information in dieser Nachricht ist jedoch trivial.

§ 939 Zur Darstellung von Information dienen Signale und Zeichen. Ein Signal ist die physikalische Repräsentation einer Nachricht, das können z.B. die Farbe einer Verkehrsampel, Intensität oder Frequenz einer Licht- oder Schallquelle, die Spannung auf einer elektrischen Leitung oder der zeitliche Verlauf dieser Spannung sein. Kleine Variationen dieser Signale ändern nicht notwendigerweise deren Bedeutung: die akustischen Signale der Sprache z.B. werden gleichermaßen verstanden, wenn ein Kind in heller Stimmlage oder ein Erwachsener in einer ganz anderen Stimmlage spricht. Auch Handschriften ergeben völlig unterschiedliche Signale, selbst wenn sie denselben Text darstellen. Bei Spannungssignalen wird in der TTL-Logik jedes Signal unterhalb 0.8 V in eine Signalklasse 0 eingeordnet, jedes Signal oberhalb 2 V in eine andere Signalklasse 1. Eine derartige Signalklasse bezeichnet man auch als Zeichen. Weitere Beispiele für Zeichen sind die Buchstaben des Alphabets, die Ziffern und die Satzzeichen. Diese Zeichen lassen sich ihrerseits zu Zeichenketten (Hyperzeichen) zusammen fassen, es entstehen damit Zeichenhierarchien: in einem Text wären diese Hierarchien gegeben durch Buchstaben – Wörter – Sätze – Abschnitte usw.

§ 940 Physikalisch gesehen sind Nachrichten also dadurch gegeben, dass Zeichen in einem bestimmten räumlichen und zeitlichen Zusammenhang auftreten. Wir werden uns in den folgenden Betrachtungen auf diskrete Signale oder Zeichen beschränken, kontinuierliche Signale (also z.B. Zeitverläufe von Spannungen) werden, außer im Zusammenhang mit dem für die Digitalisierung wichtigen Abtasttheorem, nicht betrachtet.

6.2.3 Informationsgehalt

§ 941 In der von Shannon [222, 223] begründeten Informationstheorie werden die Formen, die Nachrichten annehmen können, und die Beziehungen zwischen ihnen quantitativ untersucht. Die Beschreibungsmittel der Informationstheorie sind die Elemente der Wahrscheinlichkeitsrechnung.

Informationsquelle

§ 942 Weiter oben hatten wir bereits Information als das Neue, Unbekannte bezeichnet; hier soll an einem Beispiel erläutert werden, dass diese Definition sich durchaus innerhalb des umgangssprachlichen Bedeutungsbereiches von Information befindet. Auch wird die statistische Beschreibung der Information deutlich. Wir wollen einen ungestörten Informationskanal betrachten, um das Wesen der Information deutlich zu machen. Störungen und den Umgang mit ihnen wollen wir in Abschn. 6.4 betrachten.

§ 943 Unser ungestörter Informationskanal ist in Abb. 6.6 dargestellt: In einer Urne befindet sich eine große Menge Kugeln, davon seien 70% weiß, 20% schwarz und 10% rot. X zieht jetzt jeweils eine Kugel und ruft Y das Ergebnis zu. Dann ist X zusammen mit der Urne eine Nachrichtenquelle, die die Nachrichten ‘weiß’, ‘rot’ und ‘schwarz’ erzeugt. Y ist ein Nachrichtenempfänger, der sich genau für diese Informationen interessiert. Welche der drei Nachrichten enthält nun für Y die größte Information? Nach der Ziehung und Übermittlung von vielen Kugeln kennt der Empfänger Y die Wahrscheinlichkeit p_x für das Auftreten der einzelnen Farben: $p_w=0.7$, $p_s=0.2$ und $p_r=0.1$. Damit kennt er aber auch den Informationsgehalt dieser Nachrichten: die Nachricht ‘weiß’ enthält die geringste Information; sie ist

aufgrund ihrer großen Wahrscheinlichkeit das Standardsignal. Interessant sind erst Abweichungen von ‘weiß’; die Nachricht ‘rot’ ist am seltensten und enthält am meisten Information. Diese Zuordnung ist anschaulich, wenn man sich vorstellt, dass die Urne nur Kugeln einer Farbe enthält, z.B. weiß. Dann ist $p_w=1$ und der Empfänger Y weiß bereits vorher, welche Nachricht ihm X übermitteln wird. Da es sich dann um eine sichere Nachricht handelt, ist ihr Informationsgehalt gleich Null. Auf Grund dieser statistischen Beschreibung wird im folgenden auch manchmal der Begriff Versuchsausgang anstelle von Signal, Zeichen oder Information verwendet.

§ 944 Aus diesem Experiment ergeben sich zwei Kriterien zur Definition des Informationsgehaltes einer Nachricht:

- K1 Der Informationsgehalt I_x einer Nachricht ist umso größer, je kleiner die Wahrscheinlichkeit p_x ihres Auftretens ist, d.h. je größer ihr Überraschungswert ist. Damit wird, wie bereits oben vorgeschlagen, Information als der Neuigkeitsgehalt aber nicht die Inhaltsschwere einer Nachricht definiert.
- K2 Eine Nachricht mit der Wahrscheinlichkeit $p_x=1$, d.h. das sichere Ereignis, muss den Informationsgehalt $I_x=0$ haben.

Ein drittes Kriterium zur Definition des Informationsgehaltes erhält man bei der Verwendung mehrere Nachrichten:

- K3 Der Informationsgehalt verschiedener voneinander unabhängiger Nachrichten soll sich addieren.

§ 945 Diese Definition ist unmittelbar einsichtig aus der Interpretation der Information mittels wahrscheinlichkeitstheoretischer Begriffe. Auch für die Wahrscheinlichkeiten gilt dort, dass sich bei voneinander unabhängigen Ereignissen die Gesamtwahrscheinlichkeit eines Ereignisses durch die Multiplikation der Wahrscheinlichkeiten der Einzelereignisse ergibt. Der Unterschied in der Rechenoperation, Multiplikation statt Addition, wird deutlich werden, wenn wir zur formalen Definition der Information übergehen.

Diskrete Quelle, gleichwahrscheinliche unabhängige Symbole

§ 946 Nach dieser anschaulichen Darstellung wollen wir uns nun dem einfachsten Fall zuwenden, einer Signalquelle, die n gleichwahrscheinliche, unabhängige Symbole erzeugt. Ein Beispiel für eine derartige Quelle ist ein Würfel ($n = 6$) oder die Münze beim Münzwurf ($n = 2$). Die Wahrscheinlichkeit p_x für das Auftreten eines Symbols ist dann gegeben durch

$$p_x = \frac{1}{n} .$$

Da alle Symbole mit der gleichen Wahrscheinlichkeit p_x auftreten, hat jedes Symbol den gleichen Informationsgehalt I_x .

§ 947 In Übereinstimmung mit den oben gegebenen drei Kriterien lässt sich dann die folgende Definition des Informationsgehaltes einer Nachricht angeben:

$$I_x = ld \frac{1}{p_x} = -ld(p_x) , \quad (6.1)$$

wobei ld (log dualis) den Logarithmus zur Basis 2 bezeichnet. Die Einheit ist bit (binary digit) – nicht zu verwechseln mit Bit für Binärzeichen. Diese Definition ist einsichtig insofern, als dass das erste Kriterium K1 die Verwendung der Kehrwerte der Wahrscheinlichkeiten nahe legt, das zweite Kriterium K2 die Verwendung einer logarithmischen Definition nahe legt und das dritte Kriterium K3 diese sogar erzwingt (Addition der Informationen durch Umwandlung des Produkts der reziproken Wahrscheinlichkeiten in eine Summe der Informationsgehalte der einzelnen Zeichen). Man beachte, dass der so definierte Informationsgehalt, z.B. einer Auswahl eines Zeichens aus einem Zeichensatz, durch die Statistik, also durch die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Zeichens, bestimmt wird, nicht aber durch die Semantik, d.h. die Bedeutung des Zeichens.

§ 948 Die Verwendung des Logarithmus zur Basis 2 ist eine willkürliche Festlegung. Der logarithmus dualis wurde gewählt, damit für den einfachsten Fall einer symmetrischen, binären Nachricht mit $p_x=0.5$ (d.h. gleichviele rote und weiße Kugeln in der Urne, keine schwarzen; oder alternatives Beispiel Münzwurf) der Informationsgehalt eines Zeichens 1 bit wird, d.h.

Definition 1 Der Informationsgehalt eines Versuches mit zwei gleichwahrscheinlichen Ausgängen beträgt 1 bit.

§ 949 Diese Definition lässt sich auch auf Versuche mit einer größeren Zahl gleichwahrscheinlicher Ausgänge erweitern [54, 55]. Betrachten wir dazu einen Versuch mit $N = 2^n$ gleichwahrscheinlichen Ausgängen. Diese Ausgänge können wir zuerst in zwei gleichgroße Mengen aufteilen und dann untersuchen, in welcher der beiden Hälften der Versuchsausgang liegt. Da beide Hälften gleichwahrscheinlich sind, erfragen wir damit ein erstes bit an Information. Die Hälfte, in der sich der Versuchsausgang befindet, halbieren wir wieder, und wiederholen dieses Verfahren solange, bis die letzte Halbierung dann genau einen Ausgang ergibt. Damit haben wir

$$I = n = \text{ld}(N)$$

bit an Information erfragt. Diese Methode lässt sich auch dann anwenden, wenn N keine Zweierpotenz ist.

§ 950 Die Größe dieser Einheit bit lässt sich am Beispiel des Zahlenlotto '6 aus 49' veranschaulichen: Dabei gibt es

$$N = \binom{49}{6} = 13\,983\,816$$

Möglichkeiten, 6 Zahlen aus 49 auszuwählen. Der Informationsgehalt einer solchen Auswahl beträgt also

$$I = \text{ld} \binom{49}{6} = 23.73 \text{ bit} .$$

Zum Vergleich: Ein Würfel stellt eine Quelle dar, bei der jedes Signal mit einer Wahrscheinlichkeit von $1/6$ erzeugt wird. Damit ergibt sich ein Informationsgehalt von $\text{ld} 6 = 2.6$ bit.

Diskrete Quelle, unabhängige Symbole, unterschiedliche Wahrscheinlichkeiten

§ 951 Eine Quelle mit unabhängigen aber nicht gleichwahrscheinlichen Symbolen lässt sich leicht erzeugen durch Würfeln mit zwei Würfeln. Addieren wir dann die Augenzahl, so ergeben sich Versuchsausgänge mit Werten zwischen 2 und 12, wobei aber die Wahrscheinlichkeiten für diese Versuchsausgänge unterschiedlich sind und damit nach (6.1) auch ihr Informationsgehalt. Für dieses Beispiel würden wir für die Wahrscheinlichkeiten erhalten $p(2) = p(12) = 1/36$; $p(3) = p(11) = 2/36$; ...; $p(6) = p(8) = 5/36$ und $p(7) = 1/6$. Damit ergeben sich für die einzelnen Versuchsausgänge Informationsgehalte von $I(2) = I(12) = 5.2$ bit, $I(3) = I(11) = 4.2$ bit, $I(6) = I(8) = 2.9$ bit und $I(7) = 2.8$ bit.

§ 952 Die Sprache ist kein Beispiel für eine Quelle unabhängiger nicht gleichwahrscheinlicher Symbole. Zwar sind auch hier die Wahrscheinlichkeiten für jeden einzelnen Buchstaben unterschiedlich, so kommen z.B. die Vokale häufiger vor als Konsonanten und auch die einzelnen Vokale bzw. Konsonanten treten mit unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit auf, aber die Zeichen sind nicht unabhängig: so gibt es bestimmte Buchstabenkombinationen, die immer wieder auftreten; und es gibt sogar im Deutschen eine sichere Folge: auf ein 'q' folgt stets ein 'u'.

Ein unkonventionelles Beispiel: Diskrete Quelle, abhängige Symbole

§ 953 Lassen Sie uns eine Runde Schiffe Versenken spielen auf einem 8×8 -Board. Beginnen wir mit der einfachen Variante unabhängiger Symbole. Auf dem Board darf nur ein einzelnes U-Boot untergebracht werden, d.h. es ist ein Kreuzchen zu machen. Der Informationsgehalt ist dann 6 bit, da $\text{ld } 64 = 6$ bit. Das lässt sich einfach veranschaulichen: wir geben suchen das Kästchen durch Einschachteln. Zuerst fragen wir, ob sich das Kreuzchen in der linken oder rechten Hälfte des Boards befindet. Mit diesem Bit reduzieren wir die verbleibenden Möglichkeiten auf 8×4 . Jetzt fragen wir nach der oberen oder unteren Hälfte des Teilboards und reduzieren mit diesem zweiten Bit die Zahl der zur Verfügung stehenden Möglichkeiten auf 4×4 . Weitere 2 Bits reduzieren die Zahl der Möglichkeiten auf 2×2 ; mit insgesamt 6 Bits sind wir also bei einer Möglichkeit angelangt, dem sicheren Ereignis.

§ 954 Jetzt bringen wir ein zweites U-Boot unter. Das lässt sich nicht unabhängig vom ersten platzieren, da sich die Schiffe nicht am gleichen Ort befinden dürfen, ja nicht einmal berühren dürfen. Durch die erstere Einschränkung fällt eine der 64 Möglichkeiten weg, da es noch insgesamt 63 freie Kästchen gibt. von diesen entfallen jedoch je nach Lage des ersten U-Boots weitere 3 Kästchen (U-Boot 1 in Ecke), weitere 5 Kästchen (U-Boot 1 am Rand) oder weitere 8 Kästchen (U-Boot 1 nicht am Rand). Je nach Lage von U-Boot 1 hat die Position von U-Boot 2 einen Informationsgehalt von $\text{ld } 55$ bis $\text{ld } 60$ bit.

§ 955 Statt U-Boot 2 platzieren wir einen Kreuzer aus 4 benachbarten Kästchen auf dem Board. den Kreuzer können wir Kästchenweise platzieren: für das erste Kästchen gilt die gleiche Betrachtung wie für U-Boot 2. Der Informationsgehalt für das zweite Kästchen kann maximal 2 bit betragen: oben/unten bzw. links/rechts vom ersten Kästchen. Der Informationsgehalt wird geringer, wenn Kästchen 1 in einer Ecke gelandet ist – dann kann es nur bei der rechten unteren Ecke nur noch nach links oder oben gehen (1 Bit). Und wenn U-Boot 1 2 Kästchen nach links liegt, dann kann der Kreuzer nur noch nach oben weiter gebaut werden, d.h. die weiteren Kästchen sind festgelegt und damit ist der Informationsgehalt Null. Das dritte (und vierte) Kästchen kann maximal 1 Bit an Information zufügen, da die Orientierung des Kreuzers bereits durch die ersten beiden Kästchen bestimmt ist und nur noch die Richtung angegeben werden muss – wofern diese nicht bereits wieder durch einen Rand oder die Lage von U-Boot 1 determiniert ist.

Verständnisfrage 38 Bestimmen Sie den maximalen und den minimalen Informationsgehalt in einem Schiffe-Versenken Board.

Diskrete Quelle, kontinuierliche Symbole

§ 956 Wenn man eine Größe messen will, deren Wert in einem kontinuierlichen Bereich liegen kann, z.B. bei einer Längenmessung, so scheint es zunächst, als ob dabei zwischen unendlich vielen Messwerten zu unterscheiden wäre und in einer solchen Messung daher unendlich viel Information steckt. Tatsächlich ist aber bei jeder Messung die Genauigkeit wie auch der erfassbare Bereich begrenzt, und es ist nicht sinnvoll, diesen Bereich in feinere Zellen zu unterteilen als im Rahmen der Messgenauigkeit noch aufgelöst werden können. Erstreckt sich der Messbereich von y_1 bis y_2 und ist die absolute Auflösung im ganzen Bereich gleich Δy , so können

$$N = \frac{y_2 - y_1}{\Delta y}$$

unterschiedliche Signale erzeugt werden. Eine Messung würde dann $\text{ld}(N)$ bit Information liefern.

§ 957 Alternativ kann es auch vorkommen, dass nicht die absolute, sondern die relative Auflösung $a = \Delta y/y$ konstant ist. Dann würde man den Bereich logarithmisch abbilden mit $z = \log y$. Jeder y -Wert ist dann um einen Faktor $1 - p$ größer als der vorangehende, und

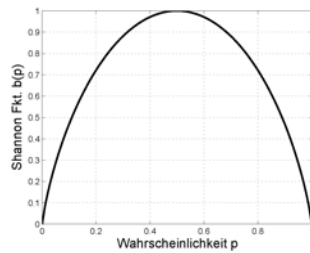


Abbildung 6.7: Shannon-Funktion

für die Beziehung zwischen den Grenzen des Messbereichs gilt $y_2 = y_1 (1 + p)^n$. Daher ergibt sich für die Zahl der Intervalle

$$n = \frac{\log\left(\frac{y_2}{y_1}\right)}{\log(1 + p)}$$

und die log y-Skala wäre in Zellen der einheitlichen Breite $\Delta z = \log(1 + p)$ eingeteilt. Der Informationsgehalt ergibt sich zu $\text{ld}(n)$.

6.2.4 Shannon-Funktion und Entropie

§ 958 Wir haben bisher den Informationsgehalt I_x eines einzelnen Zeichens betrachtet. Wenden wir uns jetzt jedoch auch der Frage nach dem mittleren Informationsgehalt eines Zeichens aus einem Zeichenvorrat zu. Letztendlich erlaubt uns diese Betrachtung ja, die Wichtigkeit bzw. den Informationsgehalt der einzelnen Zeichen besser zu beurteilen. Der mittlere Informationsgehalt eines Zeichensatzes ergibt sich durch Mittelwertbildung über alle Zeichen, wobei der Informationsgehalt jedes einzelnen Zeichens mit der Wahrscheinlichkeit des Auftretens dieses Zeichens gewichtet werden muss:

$$H = \bar{I}_x = - \sum_{x=1}^n p_x \cdot \text{ld}(p_x) .$$

Dieser mittlere Informationsgehalt H wird als die Entropie⁴ bezeichnet:

Definition 2 *Der mittlere Informationsgehalt je Zeichen, die Entropie, gibt an, wie viele Binärzeichen man bei der binären Codierung von Nachrichten für die einzelnen Zeichen im Mittel wenigstens aufwenden muss. Andererseits sind bei geschickter Codierung auch kaum mehr Zeichen erforderlich [223].*

§ 959 Die Entropie eines Binärzeichens lässt sich mit Hilfe der Shannon-Funktion (vgl. Abb. 6.7) angeben. Betrachte dazu wieder einen Versuch mit zwei Ausgängen. Diese haben die Wahrscheinlichkeiten p und $q = (1 - p)$. Der mittlere Informationsgehalt eines dieser Zeichen ist dann gegeben zu

$$H = b(p) = -p \cdot \text{ld}(p) - (1 - p) \cdot \text{ld}(1 - p) . \quad (6.2)$$

Diese Funktion $b(p)$ wird als die Shannon-Funktion bezeichnet, sie ist in Abb. 6.7 wiedergegeben. Für $p = 0$, d.h. es tritt nur eines der beiden Zeichen auf, ist der Informationsgehalt gleich Null (sicheres Ereignis), mit wachsendem p steigt der mittlere Informationsgehalt je Zeichen an bis zu einem Maximum bei $p = 0.5$: beide Ausgänge sind dann gleich wahrscheinlich. Damit ist das Ergebnis am schlechtesten vorherzusagen. Für weiter wachsendes p nimmt die Entropie wieder ab, bis sie für $p = 1$ Null wird: das ist das sichere Ereignis des anderen Signals. Dieses Ergebnis lässt sich verallgemeinern zu:

Definition 3 *Die Entropien eines Versuches mit den möglichen Ausgängen x_i ist am größten, wenn alle Ausgänge gleich wahrscheinlich sind [55].*

⁴Der Begriff der Entropie wurde aus der Thermodynamik entlehnt, wo er ein Maß für die statistische Unordnung oder Unsicherheit in einem System ist.

#	Buchstabe	$f = p_i$	$F = \Sigma p_i$	$S_i = p_i \text{ld} \frac{1}{p_i}$
1	-	0.151490	0.1514	0.41251
2	E	0.147004	0.2985	0.40661
3	N	0.088351	0.3869	0.30927
4	R	0.068577	0.4554	0.26512
5	I	0.063770	0.5192	0.25232
6	S	0.053881	0.5731	0.22795
7	T	0.047310	0.6204	0.20824
8	D	0.043854	0.6642	0.19783
9	H	0.053554	0.7078	0.19691
10	A	0.043309	0.7511	0.19616
11	U	0.031877	0.7830	0.15847
12	L	0.029312	0.8123	0.14927
13	C	0.026733	0.8390	0.13968
14	G	0.026672	0.8657	0.13945
15	M	0.021336	0.8870	0.11842
16	O	0.017717	0.9047	0.10389
17	B	0.015972	0.9207	0.09585
18	Z	0.014225	0.9349	0.08727
19	W	0.014201	0.9491	0.08716
20	F	0.013598	0.9637	0.08431
21	K	0.009558	0.9723	0.06412
22	V	0.007350	0.9796	0.05209
23	Ü	0.005799	0.9854	0.04309
24	P	0.004992	0.9904	0.03817
25	Ä	0.004907	0.9953	0.03764
26	Ö	0.002547	0.9979	0.02194
27	J	0.001645	0.9995	0.01521
28	Y	0.000173	0.9997	0.00217
29	Q	0.000142	0.9999	0.00181
30	X	0.000129	1.0000	0.00167
Σ		1.000000	4.11461	

Tabelle 6.1: Wahrscheinlichkeiten und mittlerer Informationsgehalt von Buchstaben der deutschen Sprache

6.2.5 Redundanz

§ 960 Anhand der Shannon-Funktion bzw. ihrer Verallgemeinerung auf Zeichensätze mit einem größeren Zeichenvorrat können wir erkennen, dass die maximale Entropie und damit der maximale Informationsgehalt einer Nachricht nur dann erreicht werden kann, wenn die einzelnen Nachrichtenelemente gleich verteilt und statistisch voneinander unabhängig sind. Ist dies nicht der Fall, so benötige ich zur Darstellung einer Information eine wesentlich größere Menge an Zeichen.

§ 961 Als Beispiel für eine ungleich verteilte und nicht völlig unabhängige Signalquelle sei hierzu die Sprache betrachtet. Würden in der deutschen Sprache alle 26 Buchstaben mit der gleichen Wahrscheinlichkeit $p_x=1/26$ vorkommen und unabhängig voneinander sein, so ergäbe sich für den Informationsgehalt eines Buchstabens (d.h. den mittleren Informationsgehalt eines Zeichens meines Zeichenvorrats)

$$H_0 = I = \text{ld}(26) = 4.7 \text{ bit} . \quad (6.3)$$

Betrachtet man aber einen Text, so erkennt man, dass die Buchstaben mit unterschiedlicher Häufigkeit auftreten. In einem deutschen Text z.B. tritt der Buchstabe ‘e’ mit einer Häufigkeit von 14.4% auf (nur das Leerzeichen ist mit 14.42% geringfügig häufiger), die Buchstaben ‘n’ (‘s’, ‘i’, ‘m’) haben Häufigkeiten von 8.65% (6.46%, 6.28%, 1.72%), die seltensten Buchstaben sind ‘x’ und ‘q’ mit Häufigkeiten von 0.8% bzw. 0.5% (vgl. Tabelle 6.1). Berücksichtigt man diese Verteilungen der Häufigkeiten, so ergibt sich ein mittlerer Informationsgehalt H von nur 4.1 bit/Zeichen alleine aus der Tatsache, dass die Zeichen nicht gleich wahrscheinlich sind.

§ 962 Zusätzlich müssen wir aber auch noch berücksichtigen, dass die Zeichen in der Sprache nicht unabhängig voneinander sind. Betrachtet man Folgen von Zeichen in einem Text, so zeigt sich, dass z.B. auf ein ‘a’ wesentlich häufiger ein ‘n’ folgt als ein ‘o’, dass ein ‘c’ meist in Kombination mit einem ‘h’ auftritt, häufig sogar in der Form ‘sch’, und dass auf ein ‘q’ stets ein ‘u’ folgt. Nach Küpfmüller [137] ergibt sich dann unter Berücksichtigung dieser Kombinationen und der unterschiedlichen Häufigkeiten der einzelnen Zeichen ein mittlerer Informationsgehalt H von 1.3 bit/Zeichen (verglichen mit den 4.7 bit/Zeichen bei gleich wahrscheinlichen und unabhängigen Zeichen).

§ 963 Jede Abweichung von der Gleichverteilung bzw. von der statistischen Unabhängigkeit verringert also den mittleren Informationsgehalt einer Nachricht. Diese Verringerung der Entropie wird als Redundanz bezeichnet, manchmal auch als Weitschweifigkeit übersetzt. Formal definiert sich die Redundanz als die Differenz zwischen der maximal möglichen Entropie H_0 wie in (6.3) und der in einer realen Zeichenkette steckenden Entropie H

$$R = H_0 - H . \quad (6.4)$$

Die relative Redundanz ist dann gegeben durch

$$r = \frac{H_0 - H}{H_0} .$$

Kehren wir noch einmal zu dem obigen Beispiel der deutschen Sprache zurück, so erhalten wir eine Redundanz R von 3.4 bit/Zeichen bzw. eine relative Redundanz r von 0.73. Bezüglich des Informationsgehaltes der deutschen Sprache bedeutet das, dass 73% der Sprache redundant oder überflüssig sind und nur 27% Information tragen. Wir könnten also mit einer anderen Sprachstruktur aber dem gleichen Alphabet die zur Übermittlung einer Nachricht notwendigen Materialien auf etwas über 1/4 reduzieren (Bücher würden dünner, Morsebotschaften schneller etc.).

§ 964 Ökonomisch würde die Verminderung der Redundanz daher attraktiv erscheinen. Aber auch nur erscheinen. Redundanz in der Sprache ist wichtig; zwar wird die Nachricht und damit auch die Übertragungszeit verlängert, andererseits ist jedoch das Erkennen von Fehlern und deren Korrektur möglich. So kann man in der Regel auch bei stark gestörter Telefonübertragung den Sender noch verstehen, zumindest wenn er in der Muttersprache spricht, da man aus den verstandenen Teilen die unverstandenen ergänzen kann, es aufgrund der Redundanz eben nicht auf jeden einzelnen Buchstaben ankommt. Steinbuch [228] gibt dazu verschiedene Beispiele, von denen einige im folgenden wiedergegeben werden. Ganz deutlich wird dabei, dass die gegenseitige Beziehung zwischen Zeichen (Wörtern, Satzfragmenten, Sätzen) für unser Verständnis von entscheidender Bedeutung ist. Liest man z.B. in diesem Text die sechs Buchstaben ‘Inf.....ion’, so besteht kein Zweifel, dass die fehlenden fünf Buchstaben ‘ormat’ sind und damit das ganze Wort ‘Information’ ist. Die Abhängigkeit der Zeichenergänzung vom Satzzusammenhang wird in den folgenden Beispielen deutlich. Beispielsweise werden wir im Satz ‘Es gibt konkave und kon.... Linsen’ das verstümmelte Signal ‘kon....’ als ‘konvexe’ deuten. Dagegen werden wir dasselbe verstümmelte Signal ‘kon.....’ im Satz ‘Es gibt abstrakte und kon..... Malerei’ als ‘konkrete’ deuten.

§ 965 Die Fähigkeit des Empfängers, Ergänzungen an unvollständigen Signalen vorzunehmen, hängt wesentlich von zwei Komponenten ab: (1) der Kenntnis des Empfängers über

den Sender und sein Repertoire an Nachrichten und (2) der Fähigkeit des Empfängers, die verschiedenen empfangenen Nachrichten logisch zu verknüpfen. Haben wir beispielsweise die Liste

- (1) kon....
- (2) konkordant
- (3) kon....
- (4) konsekutiv
- (5) konsequent
- (6) konservativ
- (7) konsiderabel
- (8) konsistent
- (9) konstant
- (10) konträr
- (11) kon....

so können wir bei oberflächlicher Betrachtung nicht wissen, aus welchen vollständigen Worten die verstümmelten Buchstabengruppen (1), (3) und (11) entstanden sind. Bei genauerer Betrachtung stellen wir jedoch fest, dass es sich um eine alphabetisch geordnete Liste von Adjektiven handelt. Wollen wir mit dieser Kenntnis die verstümmelten Buchstabengruppen ergänzen, so greifen wir z.B. zum Duden und ergänzen ohne großes Risiko: (1) konkav, (3) konkret und (11) konvex. Da diese Fähigkeit des Empfängers, die Signale zu ergänzen, vom Empfänger und seinen Kenntnissen über den Sender abhängt, können unterschiedliche Empfänger aus exakt denselben Signalen ein unterschiedliches Maß an Informationen entnehmen.

§ 966 Diese Bedeutung von Redundanz und Zusammenhängen in der Sprache für die Informationsaufnahme des Menschen wird in folgendem Beispiel deutlich. Dazu sind vier Zeichenketten aus je acht Buchstaben vorgegeben, der Betrachter hat jeweils eine Sekunde Zeit, sich diese Buchstabenfolgen einzuprägen:

- (1) AAAABBBB
- (2) ABCBEEPS
- (3) FGKWOSLM
- (4) TOMORROW

Dabei hat (1) die größte Redundanz, (2) und (4) sind teilweise redundant und haben, zumindest was die Häufigkeitsverteilungen der einzelnen Buchstaben angeht, gleiche Redundanz, (3) ist nicht redundant und ist gleichzeitig auch am schwersten aufzunehmen, da man sich wirklich jeden Buchstaben einzeln merken muss. (4) bildet in diesen Zeichenketten eine Sonderstellung, da es ein Hyperzeichen ist und insofern nur ein einzelnes Zeichen – wenn auch aus einem anderen Zeichenvorrat, den Wörtern der englischen Sprache – aufgenommen wird und daher auch die einzelnen Buchstaben nicht wie bei Beispiel (3) ‘gespeichert’ werden müssen. Anmerkung: bei (2) ‘betrügt’ man beim Speichern natürlich auch; kaum jemand wird sich die Buchstabenfolge so merken, eher wird man sie sich einprägen in der Form ‘die ersten drei Buchstaben des Alphabets + beeps’, da letzters schon wieder ein Hyperzeichen der englischen Sprache ist.

§ 967 Die Kenntnis (oder eher die Entfernung) der Redundanz ist für die platzsparende Codierung von Information wichtig. Als einfachstes Beispiel seien hier Versuche erwähnt, das Alphabet in einem Binärkode darzustellen (vgl. Abb. 6.8). Der älteste Binärkode für Buchstaben ist ein Blockcode und geht auf Francis Bacon (1623) [7] zurück; er basiert auf der Verwendung von 5 Zeichen pro Buchstaben. Das Morse-Alphabet (1844) dagegen bedient sich bereits einer zumindest teilweise Redundanz verminderten Codierung: je häufiger ein Zeichen auftritt, umso kürzer ist es. Letzteres stimmt bei Morse nur näherungsweise, war aber in seinem Ansatz enthalten. In Abschn. 6.3 werden wir weitere Codierungsverfahren diskutieren, die die Redundanz einer Signalquelle verringern sollen (Quellencodierung).

Buchstabe	p [%]	Bacon 1623	Morse 1844	Huffmann 1952
-	14.42	00100	00	000
E	14.40	10000	100	001
N	8.65	00110	01100	010
S	6.46	10100	11100	0110
I	6.28	01100	1100	0111
R	6.22	01010	101100	1000
⋮				
M	1.72	00111	010100	11010
⋮				
X	0.08	10111	01110100	1111111110
Q	0.05	11101	010110100	1111111110
	H_c	5	4.79	4.13

Abbildung 6.8: Binär-
codes für alphabetischen
Text, basierend auf [157]

Verständnisfrage 39 Sind Bacons fünf Binärzeichen eigentlich erforderlich?

Einschub: Künstliche Sprachen

§ 968 Am Beispiel der Sprache kann man sich sehr viele Eigenschaften von Information und diskreten Quellen klar machen, wie wir es ja auch schon im Zusammenhang mit der Redundanz gesehen haben. Insbesondere lässt sich der stochastische Aspekt verdeutlichen. Shannon und Weaver [224] folgend sei hier als ein Beispiel eine künstliche Sprache eingeführt. Diese Annäherung an eine Sprache umfasst drei Stufen:

- (A) Angenommen, wir haben 5 Buchstaben A, B, C, D und E, die jeweils mit einer Wahrscheinlichkeit von 0.2 gewählt sind, wobei aufeinander folgende Auswahlen unabhängig voneinander sind (diskrete Quelle mit gleich wahrscheinlichen, unabhängigen Symbolen). Das würde z.B. zu einer Folge führen wie

BDCBCECCADCBDDAAECEEAABBDAAEECACEEBAEECBCEAD

- (B) Nun werden dieselben 5 Buchstaben benutzt mit den Wahrscheinlichkeiten 0.4, 0.1, 0.2, 0.2, und 0.1, wobei aufeinander folgende Auswahlen ebenfalls wieder unabhängig sind (diskrete Quelle mit unabhängigen, nicht gleich wahrscheinlichen Symbolen). Eine typische Folge wäre dann:

AAACDCBDCEAADADACEDAEADCABEDADDCECAAAAAD.

- (C) Eine kompliziertere Struktur ergibt sich, wenn, wie in der gewöhnlichen Sprache, die Zeichen nicht mehr voneinander unabhängig sind, sondern ihre Wahrscheinlichkeiten von dem vorangegangenen Zeichen abhängen. Im einfachsten Fall hängt eine Auswahl nur vom direkt vorangegangenen Zeichen ab, nicht jedoch auch von früheren Zeichen. Der statistische Aufbau kann dann durch einen Satz von Übergangswahrscheinlichkeiten $p_i(j)$ beschrieben werden. Dabei ist $p_i(j)$ die Wahrscheinlichkeit, das dem Buchstaben i der Buchstabe j folgt. Ein alternativer Weg wäre die Angabe der Digramm-Wahrscheinlichkeiten (zweidimensionale Verbundwahrscheinlichkeit) $p(i, j)$, d.h. die relative Häufigkeit des Digramms ij . Die Buchstabenhäufigkeiten $p(i)$ (die Wahrscheinlichkeit des Buchstaben i), die Übergangswahrscheinlichkeiten $p_i(j)$, und die Verbundwahrscheinlichkeiten $p(i, j)$ hängen zusammen über

$$p(i) = \sum_j p(i, j) = \sum_i p(j, i) = \sum_i p(j) p_j(i),$$

$$p(i, j) = p(i) p_i(j)$$

und

$$\sum_i p_i(j) = \sum_i p(i) = \sum_{i,j} p(i, j) = 1.$$

Als ein Beispiel nehmen wir an, es gibt drei Buchstaben A, B, und C mit den Wahrscheinlichkeitstabellen

$p_i(j)$		j		
		A	B	C
A		0	$\frac{4}{5}$	$\frac{1}{5}$
B	i	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
C		$\frac{1}{2}$	$\frac{2}{6}$	$\frac{1}{10}$

i	$p(i)$	
A		$\frac{8}{27}$
B		$\frac{16}{27}$
C		$\frac{3}{27}$

$p(i, j)$		j		
		A	B	C
A	i	0	$\frac{4}{15}$	$\frac{1}{15}$
B		$\frac{8}{27}$	$\frac{8}{27}$	0
C		$\frac{1}{27}$	$\frac{4}{135}$	$\frac{1}{135}$

Ein Beispiel für eine Nachricht dieser Quelle wäre

ABBABABABABABABBBABBBBABBABABABABBBACACABBABBBBABBAB.

Dieses Verfahren lässt sich erweitern auf Trigramm-Häufigkeiten, bei denen die Auswahl eines Buchstabens von den zwei vorhergehenden abhängt. Entsprechend müssten Trigramm-Häufigkeiten $p(i, j, k)$ angegeben werden. Erweiterungen auf den allgemeinen Fall der n -gramm-Häufigkeiten sind ebenfalls möglich. Hierbei ergeben sich zwar kompliziertere Zusammenhänge aber keine neuen Strukturen.

- (D) Eine Erweiterung ergibt sich, wenn wir stochastische Prozesse definieren, die als Text eine Folge von Wörtern hervorbringen. In dieser Sprache gibt es wieder die 5 Buchstaben A, B, C, D und E und 16 Wörter mit den zugehörigen Wahrscheinlichkeiten:

0,10 A	0,16 BEBE	0,11 CABED	0,04 DEB
0,04 ADEB	0,04 BED	0,05 CEED	0,15 DEED
0,05 ADEE	0,02 BEED	0,08 DAB	0,01 EAB
0,01 BADD	0,05 CA	0,04 DAD	0,05 EE

Werden aufeinander folgende Wörter unabhängig voneinander ausgewählt und durch einen Zwischenraum getrennt, so ergibt sich eine typische Nachricht in der Form

DAB EE A BEBE DEED DEB ADEE ADEE EE DEB BEBE BEBE ADEE BED DEED DEED CEED ADEE A DEED DEED BEBE CABED BEBE BED DAB DEED ADEB

Wenn alle Wörter die gleiche Länge haben, ist dieser Prozess äquivalent zu einem der vorangegangenen, allerdings kann die Beschreibung mit Hilfe der Wortstruktur und der Wortwahrscheinlichkeiten einfacher sein. Natürlich kann man jetzt auch hier vereinfachen und Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen Wörtern einführen usw.

§ 969 Shannon [222] hat diese Abhängigkeiten in der Sprache und ihren Zusammenhang mit stochastischen Prozessen folgendermaßen illustriert: Je weiter man die Einwirkung vorhergehender Buchstaben einer Zufallsfolge von Zeichen statistisch an diejenige der wirklichen Sprache angleicht, um so mehr nähert sich ihre Struktur der der Sprache an, wenn auch der Text sinnlos bleibt. Unter Verwendung der 26 Buchstaben des englischen Alphabets und des Zwischenraums hat Shannon die folgenden Beispiele konstruiert:

- Näherung nullter Ordnung (die Zeichen sind unabhängig voneinander und gleich wahrscheinlich):

XFOML RXKHRJJFFJUZLPWCFWKCYJFFJEYVKCQSGHYDQPAAKBZAACIBZLHJQD

Damit ergibt sich ein Text, den man nur buchstabieren, nicht aber lesen kann. Sie können sich dieses veranschaulichen, wenn Sie die Zeit bestimmen, die Sie benötigen, um diese Zeichenkette laut zu lesen und sie mit der Zeit vergleichen, die Sie benötigen, um eine gleichlange Zeichenkette mit normalem Text zu lesen.

- Näherung erster Ordnung (die Zeichen sind weiterhin unabhängig, aber die Häufigkeit der einzelnen Zeichen entspricht der in der englischen Sprache):

OCRO HLI RGWR NMIELSWIS EU LL NBNESBEBYA TH EEI ALHENHTTPA OOBTTVA NAH BRL

Ein gälischer Text sieht für unsere Augen auch nicht sehr viel anders aus: Thig sealbh a'dichioll gabh beachd fair an t-sreath dhiamhair Cheilteach seo. Cum oirre dho A gu B.⁵

- Näherung zweiter Ordnung (Digramm-Struktur wie im Englischen, Shannon hat hierzu ein Buch zufällig aufgeschlagen, auf der Seite einen Buchstaben aufgepickt, das Buch geschlossen, wieder zufällig geöffnet und dann auf der Seite bis zum ersten Auftreten dieses Buchstabens gelesen und den Buchstaben zusammen mit dem darauf folgenden rausgeschrieben, Wiederholung des Verfahrens mit dem zweiten Buchstaben usw.):

ON IE ANTSOUTINYS ARE T INCTORE ST BE S DEAMY ACHIN D ILONASIVE
TOCOOWE AT TEASONARE FUSO TIZIN ANDY TOBE SEACE CTISBE

Im Gegensatz zu den beiden vorangegangenen Versuchen kann man diesen Text schon fast 'lesen': man muss nicht mehr alle Zeichen einzeln buchstabieren und kann damit eine längere Zeichenkette als im ersten Beispiel in einer kürzeren Zeit lesen.

- Näherung dritter Ordnung (Trigramm-Struktur wie im Englischen, wie oben, aber mit drei Buchstaben):

IN NO IST LAT WHEY CRACTICT FROURE BIRS GROCID PONDENOME OF DE-
MONSTURES OF THE REPTAGIN IS REGOACTIONA OF CRE

- Näherung erster Ordnung, auf Wörter bezogen (Wörter treten hierbei nur mit ihren natürlichen Häufigkeiten auf):

REPRESENTING AND SPEEDILY IS AN GOOD APT OR COME CAN DIFFERENT
NATURAL HERE HE THE A IN CAME THE TO OF TO EXPERT GRAY COME TO
FURNISHES THE LINE MESSAGE HAD BE THESE

- Näherung zweiter Ordnung, auf Wörter bezogen (wie die Digramm-Struktur bei den Buchstaben erzeugt, einzelne Folgen von Worten lassen sich hierbei ohne Problem in sinnvolle Sätze einbauen, die längste Folge umfasst die elf unterstrichenen Wörter, die sich mit etwas Mühe in dieser Reihenfolge noch in einen sinnvollen Satz einbauen lassen):

THE HEAD AND IN FRONTAL ATTACK ON AN ENGLISH WRITER THAT THE
CHARACTER OF THIS POINT IS THEREFORE ANOTHER METHOD FOR THE
LETTERS THAT THE TIME WHO EVER TOLD THE PROBLEM FOR AN UNEX-
PECTED

Zwischenrechnung 19 Sie können etwas mit verschiedenen Texten spielen bis hin zu den unter dem Projekt Gutenberg http://www.gutenberg.org/wiki/Main_Page gesammelten ASCII-Texten bekannter und unbekannter Klassiker. Picken Sie sich zwei sehr unterschiedliche längere Texte heraus und bestimmen Sie die Häufigkeiten der einzelnen Buchstaben inkl. der bedingten Häufigkeiten (MatLab → Abschn. 9.2.5?). Verwenden Sie den gleichen Text in verschiedenen Sprachen. Lassen Sie den Rechner dann künstliche Sprachen basteln. Wenn Sie sehr ambitioniert sind, versuchen Sie das gleiche mit einem sehr langen Text (Bibel, Dickens, Tolstoi?) nicht auf Buchstaben sondern auf Wortbasis.

Markoff- und ergodische Prozesse

§ 970 Stochastische Prozesse der beschriebenen Art werden als Markoff-Prozesse bezeichnet. Der allgemeine Fall lässt sich folgendermaßen beschreiben: Es existiert eine bestimmte Anzahl S_1, S_2, \dots, S_n von möglichen Zuständen des Systems. Ferner gibt es einen Satz von Übergangswahrscheinlichkeiten $p_i(j)$, die die Wahrscheinlichkeit angeben, mit der das System von einem Zustand S_i in einen Zustand S_j übergeht. Um aus einem solchen Markoff-Prozess eine Informationsquelle zu machen, müssen wir annehmen, dass bei jedem Übergang von einem Zustand in einen anderen ein Zeichen erzeugt wird. Diese Zustände entsprechen dem noch verbleibenden Einfluss der vorhergehenden Buchstaben.

⁵Die Kraft der Konzentration kann Erfolg bringen, versuch es selbst und verfolge die Linie dieser heiligen keltischen Schnur von A bis B. – Inschrift auf dem Groundle Stone, Insel Man)

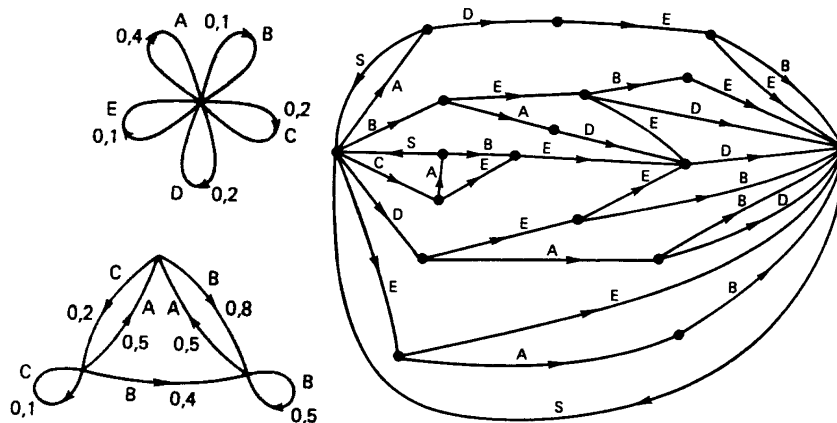


Abbildung 6.9: Diagramme der Quellen B, C und D aus dem Beispiel der künstlichen Sprachen [224]

§ 971 Abbildung 6.9 zeigt dazu grafische Darstellungen der Quellen (B), (C) und (D) aus dem Beispiel in § 968. Die Zustände sind die Knotenpunkte, die Wahrscheinlichkeiten und Buchstaben, die bei einem Übergang entstehen, sind an den Linien angegeben. Im linken oberen Teil (Quelle (B)) gibt es nur einen Zustand, da die aufeinander folgenden Buchstaben unabhängig sind. Im linken unteren Teil (Quelle (C)) gibt es so viele Zustände wie Buchstaben. Wenn ein Trigramm-Beispiel konstruiert würde, gäbe es höchstens n^2 Zustände, entsprechend den möglichen Buchstabenpaaren, die einem einzelnen gewählten Buchstaben vorangehen. Das rechte Diagramm entspricht dem Beispiel der Wortstruktur in Quelle (D), hier entspricht 's' dem Leerzeichen oder Wortzwischenraum.

Verständnisfrage 40 Erläutern Sie das rechte Diagramm in Abb. 6.9 ausführlich.

§ 972 Anhand der Diagramm-Strukturen in Abb 6.9 lässt sich das Konzept der ergodischen oder statistisch homogenen Quellen einführen. Alle in einem ergodischen Prozess erzeugten Folgen haben dieselben statistischen Eigenschaften. Daher werden sich die von bestimmten Folgen erhaltenen Buchstabenhäufigkeiten, Digrammhäufigkeiten usw. bei einer Vergrößerung der Länge der Folgen festgesetzten Grenzen nähern, und zwar unabhängig von der Folge. Dadurch können wir beim Buchstaben zählen auch wirklich auf die Eigenschaften der Quelle zurück schließen und nicht nur auf die Eigenschaften der Folge.

§ 973 Alle hier betrachteten Beispiele künstlicher Sprache sind ergodisch. Diese Besonderheit hängt mit der Struktur des dazu gehörigen Diagramms zusammen. Ein Prozess ist ergodisch, wenn das Diagramm die beiden folgenden Eigenschaften hat:

- (E1) Das Diagramm zerfällt nicht in zwei getrennte Teile A und B, so dass es unmöglich wäre, von Knotenpunkten im Teil A über Linien des Diagramms in Pfeilrichtung zu Knotenpunkten im Teil B zu gelangen und umgekehrt.
- (E2) Eine geschlossene Linie im Diagramm mit Pfeilen, die in die gleiche Umlaufrichtung zeigen, wird ein Umlauf genannt. Die Länge eines Umlaufs ist durch die Anzahl der in ihm vorkommenden Linien gegeben. Die Folge BEBES im rechten Teil von Abb. 6.9 ist ein Umlauf mit der Länge 5. Eine zweite notwendige Eigenschaft ist, dass der größte gemeinsame Teiler der Länge aller Umläufe im Diagramm 1 ist.

Falls die letzte Bedingung verletzt ist, d.h. es gibt einen größten gemeinsamen Teiler größer als 1, besitzen die Folgen eine gewisse periodische Struktur.

6.2.6 Abtasttheorem (Signal als kontinuierliche Funktion der Zeit)

§ 974 Geschriebene Sprache ist ein Signal aus diskreten Symbolen und lässt sich daher mit den oben beschriebenen Tools untersuchen (oder simulieren). Gesprochene Sprache ist dage-

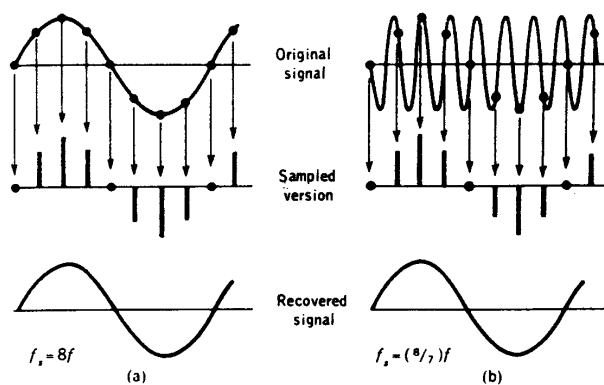


Abbildung 6.10: Aliasing: Falsche Rekonstruktion eines Signals durch zu geringe Abtastfrequenz [230]

gen ein zeitkontinuierliches Signal. Das Gehirn, zumindest wenn es mit einer ihm bekannten Sprache konfrontiert wird, verarbeitet nicht den Datenstrom sondern die darin kodierten Hyperzeichen – damit wird das zeitkontinuierliche Signal wieder ähnlich verarbeitet wie geschriebene Sprache.

§ 975 Ein CD- oder ein MP3-Player kann Sprache im Gegensatz zur alten Schallplatte nicht als kontinuierliches Signal sondern nur als eine Folge diskreter Signale aufzeichnen. Grundlage ist das Abtasttheorem. Mit ihm wird ein analoges (zeitkontinuierliches) Signal in ein digitales Signal umgewandelt. Das Abtasttheorem lässt sich mit Hilfe von Sprache einfach veranschaulichen, tritt aber praktisch überall in der Messtechnik auf: wer liest heutzutage noch die Quecksilbersäule eines Thermometers ab? Stattdessen wird lieber das digitalisierte Signal des Digitalthermometers verwendet.

§ 976 Bei einem kontinuierlichen Signal scheint es, ebenso wie bei einem Signal aus einem kontinuierlichen Zeichenvorrat, als hätten wir zwischen unendlich vielen möglichen Werten zu unterscheiden und damit auch unendlich viel Information in diesem Signal. Tatsächlich sind aber bei einer Messung wieder sowohl die Genauigkeit Δx als auch der erfassbare Bereich (x_1, x_2) begrenzt.

§ 977 Betrachten wir dazu ein Signal als eine kontinuierliche Funktion der Zeit mit einem kontinuierlichen Messbereich. Der Informationsgehalt des Signals ist demnach unendlich groß. Bei einem zeitkontinuierlichen Signal müssen wir im Prinzip zu jedem Zeitpunkt die Information über die Amplitude übertragen. Das ist jedoch aufgrund der endlichen Zeitauflösung und der Messfehler nicht möglich. Wir können uns aber die Frage stellen, wie oft wir einen Messwert übertragen müssen, um die Funktion zuverlässig rekonstruieren zu können. Hat die Zeitfunktion $s(t)$ ein Spektrum, das ausschließlich im Frequenzbereich f von 0 bis B liegt, lässt sie sich durch Abtastproben vollständig beschreiben, wenn für das Abtastintervall T bzw. der Abtastfrequenz f gilt

$$T \leq \frac{1}{2B} \quad \text{oder} \quad f \geq 2B \quad (6.5)$$

(Shannon'sches Sampling Theorem, Abtasttheorem). Beweise dieses Theorems finden sich z.B. [223] oder [56].

§ 978 Das Gleichheitszeichen in (6.5) erscheint auf den ersten Blick uneinsichtig, da wir bei einer Abtastfrequenz, die genau das Doppelte der Signalfrequenz ist, im ungünstigsten Falle immer die Nulldurchgänge des Signals erfassen und daher kein Signal rekonstruieren können. Dieses Problem wird auf technische Weise dadurch umgangen, dass das um 90° phasenverschobene Signal ebenfalls vorliegt, von dem in diesem Falle dann die Maxima abgetastet würden, so dass das Originalsignal wieder rekonstruiert werden kann [96]. Liegt kein zeitverschobenes Signal vor, so gilt in (6.5) automatisch das kleinere.

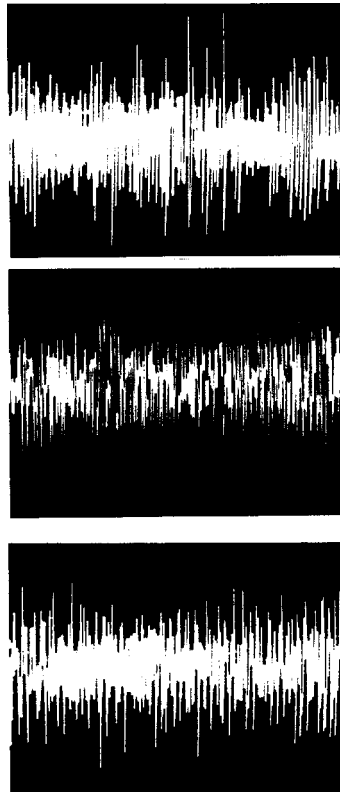


Abbildung 6.11: Verschiedene Schallquellen: Unterscheiden Sie zwischen dem Geräusch, das das Publikum beim Betreten des Hörsaales macht, einem Violinkonzert und dem Stimmen der Instrumente in einem Sinfonieorchester [235]

§ 979 Ist diese Voraussetzung nicht erfüllt, kann es zu Fehlinformationen (Aliasing) kommen. Abbildung 6.10 zeigt dazu das Beispiel zweier sinusförmigen Signale. Die Abtastfrequenz sei gegeben durch f_s , im linken Beispiel ist $f=8f_s$ und das Signal kann vollständig wieder hergestellt werden, im rechten Beispiel ist $f_s=(8/7)f$, die Abtastung erfolgt zu selten und das rekonstruierte Signal ist falsch.

§ 980 Eine Vorstellung über den Informationsgehalt in einem kontinuierlichen Signal liefert die digitale Speicherung von Musik. Die Bandbreite erstreckt sich dabei bis zu 16 kHz, d.h. nach dem Abtasttheorem sind 32 000 Stützstellen zum Abtasten dieses Signals erforderlich. Geht man davon aus, dass an jeder Stützstelle die Amplitude in 256 Werte eingeteilt wird (das entspricht 8 Bit), so erhält man eine Gesamtinformationsmenge von 256 000 bit/sec. Der Mensch dagegen kann nur ca. 20 bit/sec aufnehmen (vgl. Tabelle 6.6, [247]). Die Informationsaufnahme des Menschen lässt sich im Prinzip mit Tests wie den oben gegebenen Achtzeichenketten bestimmen [228, 244, 247]. Da wir aber andererseits Musik wahrnehmen und auch relativ feine Unterschiede zwischen verschiedenen Aufnahmen erkennen können, muss der Mensch bei der Informationsaufnahme und -auswertung stark mit Mustern und Hyperzeichen arbeiten. Für die Codierung ist auf jeden Fall noch genug zu entfernende Information da – manchmal muss man diese nur hinreichend geschickt auswählen.

6.2.7 Menschliche Informationsverarbeitung: Verwendung von Hyperzeichen im Erkennen

§ 981 Ein sehr interessanter Seitenaspekt im Zusammenhang mit der Informationstheorie betrifft die Informationsverarbeitung durch den Menschen. Dazu gehören sowohl die Aufnahme von Information durch (sehr) beschränkte Kanäle als auch die Verarbeitung der Information, insbesondere im Bereich des Lernens. Vor ca. 30 Jahren war das Gebiet der Informationspsychologie sehr populär, in den 1990ern und 1990ern wurde Lernen eher vom Aspekt der Motivation als dem der Information her untersucht. Erst im Zuge des Aufblühens der

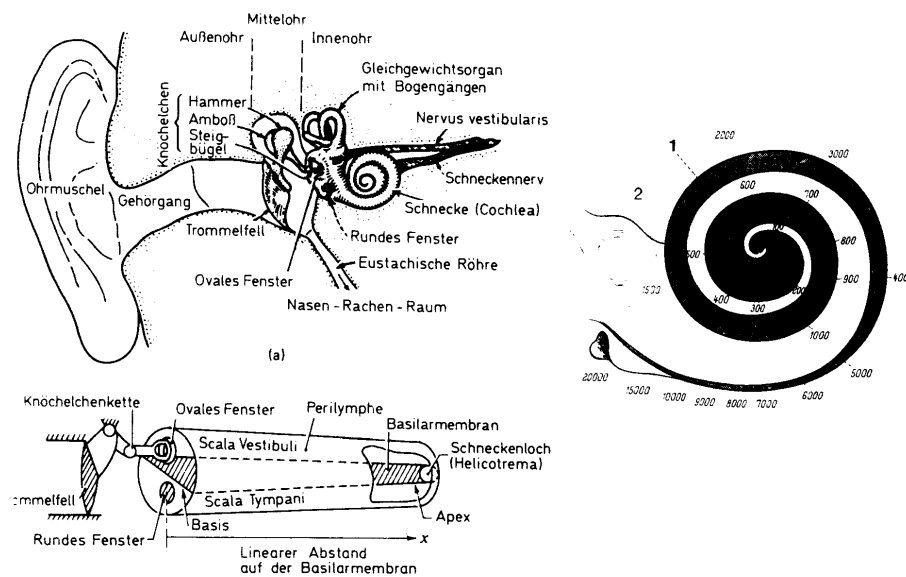


Abbildung 6.12: Aufbau des menschlichen Ohres (links, Teil a) mit schematischer Darstellung der Schnecke (links, Teil b; [203]). Im rechten Teil Schema der Basilarmembran in der Schnecke mit Angabe der dazugehörigen Töne in Hz [153]

Neurowissenschaften wird der informationstheoretische Aspekt des Lernens wieder stärker berücksichtigt. Gute klassische, allerdings nicht mehr in allen Punkten aktuelle Bücher sind Steinbuch [228], von Cube [247], Hassenstein [91] oder Vester [244]; die modernen, an den Neurowissenschaften Bücher sind z.B. Engel und van den Broeck [52], MacKay [158] oder Shakhnarovich et al. [221].

§ 982 Ich möchte hier nur einige sehr wenige (und leider unzusammenhängende) Beispiele vorstellen, um einen menschlichen Aspekt in die Informationstheorie einzubringen. Dazu gehört insbesondere die Mustererkennung zur Reduktion des Informationsflusses. Wir hatten im Zusammenhang mit dem Abtasttheorem erfahren, dass wir beim Musikhören einen Informationsfluss von ca. 250 000 bps verarbeiten müssten, verglichen mit den maximal 20 bps, die der Mensch aufzunehmen vermag. Betrachten wir dazu Abb. 6.11. Dort sind Oszillogramme von drei verschiedenen Geräuschen gezeigt. Eines gibt das Geräusch wieder, das entsteht, wenn das Publikum den Hörsaal betritt. Ein anderes Oszillogramm stammt von einem Sinfonieorchester am Ende des ersten Satzes von Mendelssohns Violinkonzert und das dritte von einem Sinfonieorchester beim Stimmen vor dem Konzert. Die Reihenfolge der Kurven ist zufällig. Welche Kurve gehört zu welchem Geräusch? (Lösung in § 987)

§ 983 Ganz offensichtlich arbeitet das Ohr in einer Weise, die es ihm erlaubt, aus diesen für das Auge ununterscheidbaren Signalen genau die wichtigen Merkmale herauszuarbeiten. Andererseits kann es aber auch nicht wie ein AD-Wandler arbeiten, da dann ein vom Menschen nicht mehr beherrschbarer Informationsfluss entstehen würde, d.h. das Ohr muss ein anderes Verfahren als die digitale Schallaufzeichnung verwenden.

§ 984 Betrachten wir dazu den Verlauf eines Signals im Ohr (nach [260], zur Struktur des Ohres siehe Abb. 6.12). Von der Ohrmuschel gelangt der Schall in den Gehörgang, wo er durch Resonanz verstärkt wird. Am Ende des Gehörganges trifft er auf das Trommelfell und löst damit eine Bewegung der drei Gehörknöchelchen im Mittelohr (Hammer, Amboss und Steigbügel) aus. Diese leiten das Schallsignal an das mit Flüssigkeit gefüllte Innenohr weiter, wo sich Hör- und Gleichgewichtsorgan befinden. Das Hörorgan wird aufgrund seiner Form als Schnecke (Cochlea) bezeichnet (vgl. Abb. 6.12). Stellt man sich die Cochlea entrollt vor, so erhält man einen Schlauch, der durch die Basilarmembran longitudinal in

ein oberes und ein unteres Kompartiment unterteilt ist. Beide Räume werden von der Perilymphe, einer extrazellulären Flüssigkeit durchspült. Die cochleäre Trennwand zwischen den beiden Flüssigkeitskompartimenten ist komplex aufgebaut: In der Mitte befindet sich ein flüssigkeitsgefüllter Hohlraum (Scala media), der von oben von einer dünnen Membran (Reissnersche Membran) und nach unten vom Cortischen Organ begrenzt wird.

§ 985 Ein Schallsignal wird vom Steigbügel zuerst an die Perilymphe des oberen und dann an die des unteren Cholea-Schlauches weitergegeben. Dadurch ergibt sich eine Wellenbewegung der cochleären Trennwand von der Basis zur Spitze (Wanderwelle). Dies ist so ähnlich, wie wenn jemand mit der Handkante auf ein gespanntes (reales) Seil schlägt: man sieht eine Welle wandern, die früher oder später abebbt. Im Gegensatz zur Seilwelle nimmt die Wanderwelle im Innenohr jedoch durch nichtlineare Effekte zuerst stark zu und verschwindet dann plötzlich, sobald sie an einem charakteristischen Ort entlang der cochleären Trennwand ihr Maximum erreicht hat. Dieser Punkt hängt von der Frequenz des Tones ab: bei hohen Tönen liegt er in der Nähe der Cochleaspitze, bei tiefen Tönen befindet er sich bereits kurz hinter der Steigbügelfußplatte. Mittlere Töne bilden sich in der Mitte der cochleären Trennwand ab, d.h. es ergibt sich eine Frequenzdispersion. Damit ist, wie auf der Tastatur eines Klaviers, jeder Ort entlang der Trennwand in der Hörschnecke einem bestimmten Ton zugeordnet. Allerdings ist der Tonumfang nicht so begrenzt wie auf der Klaviertastatur: die Cochlea kann auf begrenztem Raum rund 7 000 Tonhöhen auseinanderhalten. Diese Frequenzselektivität geht ganz wesentlich darauf zurück, dass das Amplitudenmaximum der Wanderwelle nicht rund, sondern sehr spitz ist. Sowohl das Amplitudenmaximum als auch seine präzise Spitze werden von hoch spezialisierten Zellen, den äußeren Haarzellen, im Cortischen Organ erzeugt.

§ 986 Damit hat das Ohr eine ganz andere Funktionsweise als ein AD-Wandler. Während dieser eine Zeitfunktion $f(t)$, also z.B. eines der in Abb. 6.11 gezeigten Oszillogramme, analysieren müsste, unterscheidet das Ohr ‘nur’ das Vorkommen bestimmter Frequenzen. Die einkommende Information wird also von der Zeitserie $f(t)$ auf das Auftreten bestimmter Töne verdichtet (Bestimmung eines Frequenzspektrums eines Tones – in einem gewissen Sinne macht die Cochlea eine Fourier-Analyse des einfallenden Tons). Eine derartige Informationsverdichtung ist ein natürlicher Vorgang, der es einem Nervensystem mit begrenzter Kapazität gestattet, mit einer sehr komplexen Umwelt fertig zu werden. Ohne die Verdichtung von Informationseingaben würde das Zentralnervensystem überwältigt werden [247]. Diese Informationsverdichtung beschränkt sich aber nicht nur auf die Reduktion des Zeichenvorrates (eben 7 000 Töne statt der Zeitserie), sondern umfasst auch eine Vielzahl anderer Vorgänge im Zentralnervensystem, dazu gehören die Bildung von Autokorrelationen zum Erkennen von Intervallen, die Bildung von Kreuzkorrelationen zum räumlichen Hören und weiteres [203].

§ 987 Die Bedeutung der Musik als Informationsträger lässt sich auch in anderem Zusammenhang darstellen. Die volle Zeitserie $f(t)$ enthält die größte Informationsmenge. Dennoch lassen sich Musikstücke (unter Verwendung von Tönen bzw. Tonsprüngen, also nicht durch einfache Angabe des Titels) durch sehr geringe Zeichenfolgen eindeutig identifizieren. Ein Beweis dafür, dass mit wenigen Tonfolgen große Informationsmengen überliefert werden können, ist das Dictionary of Tunes von Parson [182]. Stellen Sie sich die Situation vor: Sie hören eine Melodie oder summen sie vor sich hin, können aber beim besten Willen weder auf den Titel noch den Komponisten des Stückes kommen. Um sie in Parsons Melodienverzeichnis zu finden, müssen sie nur die Abfolge der ersten 15 Noten kennen. Dabei kommt es aber nicht auf die musikalische Notierung an, sondern Sie müssen nur wissen, ob die folgende Note tiefer, höher oder gleich hoch ist. Diese Codierung ist Kontext abhängig. Für die Melodie von ‘He-jo, spannen den Wagen an’ würde sich dann die Folge *THWWWTHWHWHWWWT ergeben, wobei der * den ersten Ton angibt und H, T, W, ob der folgende Ton tiefer, höher oder eine Wiederholung des vorhergehenden ist. Diese kurze Kette ist ausreichend, um ein bestimmtes Stück aus einem Repertoire von mehr als 10 000 klassischen und 6 000 populären Themen zu identifizieren (wenn alle Tonfolgen auftreten könnten, könnte man mit 15 Zeichen aus einem drei-elementigen Zeichenvorrat $3^{15} = 14.35$ Mio verschiedene Kombinationen

*WWWWW WWWWW WWHWH	Sullivan	The lost chord (Lied)
*WWWWW WWWWW WWHHH	Sibelius	Valse triste, 2. Takt, orch. op. 44
*WWWWW WWWWW WHTTT	Strawinski	Petruschka: Tableau, 2. Takt
*WWWWW WWWWW WHTTT	Beethoven	Sinfonie Nr. 5 c-moll, 3. Satz 2. Takt
*WWWWW WWWWW WHTTT	Hummel	Trompetenkonzert E-Dur, 3. Takt
*WWWWW WWWWW WHTWT	Verdi	Requiem aeternam
*WWWWW WWWWW WHHTW	Berlioz	Requiem Nr. 8, Hostias
*WWWWW WWWWW WHHW	J. Strauss jr.	Geschichten a. d. Wienerwald Nr. 5, 1. Takt
*WWWWW WWWWW WHHWW	Beethoven	Sinfonie Nr. 7 A-Dur, 2. Satz 1. Takt
*WWWWW WWWWW HTTWT	Mozart	Serenade E-Dur, 1. Satz 1. Takt, K 375

*THTHH TTHHT THTHH	Strawinski	Petruschka: Tanz der Zigeunerinnen
*THTHH TTHHT THHTH	Strawinski	Sinfonie in 3 Sätzen, 2. Satz 3. Takt
*THTHH TTHHT HTHTH	Händel	Cembalo-Suite Nr. 5 E-Dur, 3. Satz
*THTHH TTHHT HTHTH	D'Indy	Sinfonie ü. Hirtengesang, 3. Satz 1. Takt
*THTHH TTHHT HHTHT	Schubert	Sinfonie Nr. 8 h-moll, „Unvollendete“, 1. Satz 2. Takt, D 759
*THTHH TTHHW TWTWT	Schubert	Klaviersonate A-Dur, 2. Satz 1. Takt, D 959
*THTHH TWHTT HHTHT	Mahler	Lieder & Gesänge aus der Jugendzeit, Nr. 2, Erinnerung
*THTHH TWTHH TWHTH	Mozart	Flötenkonzert Nr. 2 D-Dur (Oboe C-Dur), 2. Satz, K 314
*THTHH TWTHH WTTHT	Sibelius	Rückkehr v. Limminkainen, 3. Takt, op. 27/4
*THTHH TWTHH THHTW	Beethoven	Bläser-Oktet E-Dur, allegro, op. 103

Abbildung 6.13: Auszug aus Parsons Dictionary of Tunes [235]

darstellen). Abbildung 6.13 zeigt zwei Ausschnitte aus diesem Verzeichnis. Auch wenn die Mächtigkeit dieses einfachen Ordnungs- und Identifikationssystems sicherlich beeindruckend ist, ein Blick auf Abb. 6.13 ist ähnlich unbefriedigend wie einer auf Abb. 6.11 (hier waren übrigens oben Mendelssohns Violinkonzert, in der Mitte das Stimmen im Sinfonieorchester und im unteren Teilbild das Geräusch des Publikums beim Betreten des Saales gezeigt): zwar sind die Informationen vollständig (im Falle von Abb. 6.11) bzw. sehr geschickt verpackt (im Falle von Abb. 6.13), aber in beiden Fällen ist die bewusste Wahrnehmung im Gehirn des Betrachters eine völlig andere als im Falle des Hörens des Geräusches bzw. Musikstückes. Insbesondere ist ein ‘Wiedererkennen’ entweder praktisch unmöglich (Abb. 6.11) oder sehr erschwert (Abb. 6.13). Allerdings sind in letzterem Code auch praktisch alle Redundanzen beseitigt, die ja auch beim normalen Lesen die Aufnahme des Textes erleichtern (vgl. die Beispiele zur künstlichen Sprache).

§ 988 Aber nicht nur das Ohr komprimiert die einfallende Information. Bevor diese Information bewusst aufgenommen werden kann, wird sie teilweise analysiert, insbesondere unter der Fragestellung, ob sich eine Entschlüsselung der Botschaft überhaupt lohnt. Besonders deutlich wird dies z.B. auf einer Party oder in anderen Situationen mit starkem akustischem Hintergrund. Dabei kann es geschehen, dass beide Ohren unterschiedliche Informationen empfangen. Die mit dem einem Ohr empfangene Information kann dann zurückgewiesen werden, obwohl sie technisch ‘gehört’ wurde. Der Unterschied zwischen den beiden unterschiedlichen Nachrichten besteht also nicht darin, dass sie von den Ohren unterschiedlich empfangen wurden, sondern dass die eine ins Gedächtnis ‘übertragen’ wurde, die andere aber nicht. Das bedeutet: wir können Nachrichten empfangen, ohne dass sie in das Gedächtnis übergehen. Man bezeichnet diesen Vorgang auch als selektive Wahrnehmung. Das Ohr, das nicht ‘erhört’ wird, scheint aber von einem Teil des Gehirn relativ genau ausgewertet zu werden. Nur so lässt sich z.B. verstehen, warum der Filter der selektiven Wahrnehmung in der Muttersprache wesentlich besser funktioniert als in einer Fremdsprache (und mit wachsendem Gewohnheitsgrad der Fremdsprache besser wird).

§ 989 Eine noch wesentlich stärkere Selektion der einströmenden Information muss vom Sehsystem vorgenommen werden. Der auf die Netzhaut einströmende Informationsfluss beträgt ungefähr 10 Millionen bps, von denen das Gehirn aber nur ca. 40 bps verarbeiten und nur wenige bit in das Langzeitgedächtnis überführen kann. Ähnlich dem Hörsinn erfolgt auch beim Gesichtssinn eine erhebliche Nachrichtenkompression und -selektion bereits in der ers-

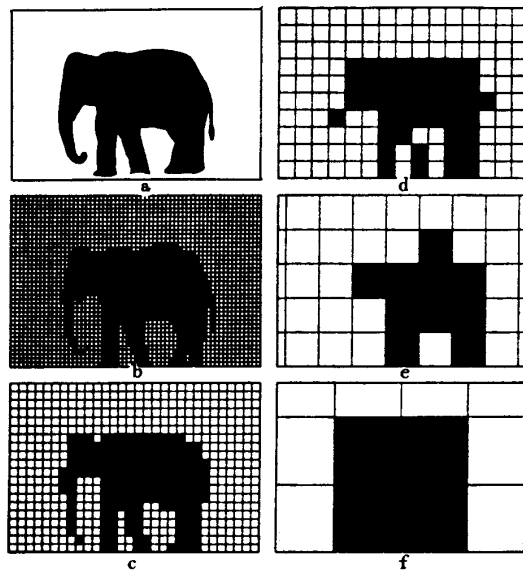


Abbildung 6.14: Bildvorlage mit unterschiedlicher Rasterung: (a) durch das Druckverfahren bestimmte, sehr feine Rasterung mit einer großen Zahl von Bildpunkten, (b) 2400 Pixel, (c) 600 Pixel, (d) 150 Pixel, (e) 37.5 Pixel und (f) 9.4 Pixel [228]

ten Station des Sehsystems, in der Netzhaut.

§ 990 Die Informationsreduktion des Auges lässt sich leicht anhand von Abb. 6.14 illustrieren, die auch gleichzeitig als Illustration zum Thema Mustererkennung verwendet werden kann. Im linken oberen Teilbild ist ein Elefant in der durch die Druckqualität bedingten Auflösung gezeigt. Ein Film z.B. würde für die dieser Auflösung entsprechende Pixelzahl jeweils die Information schwarz oder weiß zu übertragen haben, d.h. die Informationsmenge entspräche dem Logarithmus dualis der Pixelzahl. Geht man zu Abbildung (b), so ist die Pixelzahl auf 2 400 ($\lg 2\,400 = 11.1$) verringert, der Elefant aber immer noch eindeutig zu erkennen. Verringern wir die Auflösung weiter auf 600 Pixel (Abbildung (c), $\lg 600 = 9.1$), so ist der Elefant ebenfalls noch zu erkennen. Verringern wir die Pixelzahl weiter auf 150 Pixel (Abbildung (d), $\lg 150 = 7.1$), so ist es bereits schwieriger, den Elefanten zu erkennen. Haben wir aber zusätzlich Informationen, z.B. dass das Signal ein Tier darstellen soll, so kann eine Identifikation weiterhin möglich sein. Erst beim Übergang zu noch gröberen Gittern ist der Informationsgehalt zu gering, um die Nachricht 'Elefant' noch zu decodieren, in (e) könnte man auch versucht sein, die Form durch einen Turnierkrieger mit angelegter Lanze zu beschreiben. Allerdings sind die Abbildungen (a), (b), (c) und (d) nur im Hinblick auf die Nachricht 'Elefant' identisch. Eine Unterscheidung zwischen indischem und afrikanischem Elefanten oder genauere Informationen über den speziellen Elefanten in der Abbildung (Größe, Geschlecht, auffällige Merkmale) setzen eine hohe Auflösung (und damit einen größeren Informationsgehalt) voraus. Und die Information Elefant wird sehr platzsparend codiert – nicht über das aktuelle Bild sondern über ein Hyperzeichen.

§ 991 Allerdings ist die Informationstheorie nicht nur wichtig, wenn es um den Nachrichtenempfänger 'Mensch' und die Aufnahme und Verarbeitung der Zeichen durch die menschlichen Sinne und das Gehirn geht. Die eben angesprochenen Bereiche des Erkennens, sowohl im akustischen als auch im optischen Kanal, werden auch in der Mustererkennung behandelt. Hierbei geht es darum, einem Computer durch optische oder akustische Eingabe Anweisungen zu erteilen. Während die optische Mustererkennung bereits recht gut entwickelte Verfahren hat, die auch teilweise in die Bearbeitung der von einem Satelliten gemachten Bilder Eingang finden, ist die Spracherkennung noch sehr rudimentär. Das Problem liegt darin, dass das menschliche Ohr zwar einen geringeren Informationsfluss empfängt als das Auge, diese Informationen aber weniger einfach zu verarbeiten sind. Insbesondere sind in der Sprache die gleichen Buchstaben von Sprecher zu Sprecher unterschiedlich (mit starken regionalen Unterschieden), wobei unterschiedliche Buchstaben in ihren Signaturen soweit voneinander abweichen, dass die individuellen Unterschiede zwischen den verschiedenen Darstellungen des Buchstaben meistens

kleiner sind als die Unterschiede zwischen zwei verschiedenen Buchstaben. Daher ist es kein Problem, für einen PC oder anderen Rechner einen halbwegs anständig arbeitenden Scanner mit Texterkennung zu finden. Spracheingabe in den Computer dagegen hat sich, trotz intensiver Bemühungen, nur langsam bis hin zu den heute halbwegs zuverlässigen Systemen entwickeln können.

6.2.8 Zusammenfassung

§ 992 In diesem Abschnitt haben wir Information als das Unbekannte bzw. Unerwartete kennengelernt. Die ‘Bedeutungsschwere’ einer Nachricht ist dabei unerheblich, es zählt nur, was sie beim Empfänger an Unsicherheit oder Unwissen beseitigt. Formal wird Information mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsrechnung oder Statistik beschrieben, eine mathematische Formulierung, die den Aspekt des Unerwarteten in der Information noch unterstreicht. Allerdings zeigt diese Definition auch, dass der Informationsgehalt einer Nachricht eine subjektive Größe ist, die einerseits vom Kenntnisstand des Empfängers abhängt, andererseits aber auch von den physikalischen Eigenschaften des Empfängers. So wird zur digitalen Speicherung eines Musikstückes eine wesentlich größere Zahl von bits benötigt, d.h. ein größerer Informationsfluss erzeugt, als das Ohr beim Hören der gleichen Zeitreihe, allerdings unter anderen Verarbeitungsprinzipien, erkennen könnte. Nicht alle Zeichen, die wahrgenommen werden, tragen auch Information bzw. den vollen Informationsgehalt. Dies wird durch das Konzept der Redundanz oder Weitschweifigkeit beschrieben. Ist die Codierung der Information optimal, so wird die Redundanz Null. Sprache dagegen ist hochgradig redundant, nur 27% der Sprache tragen wirklich Information. Was einerseits als Verschwendung erscheinen mag, hat andererseits den Vorteil, dass eine Verständigung auch bei gestörten Kommunikationskanälen noch möglich ist, da die fehlenden Teile aus dem Zusammenhang ergänzt werden können.

6.3 Codierung I: Quellencodierung

§ 993 Codierung hat zwei Aufgaben: bei der Quellencodierung geht es darum, die Signale einer Quelle in Abhängigkeit von den Eigenschaften dieser Quelle in einen möglichst sparsamen (Binär-)Code umzusetzen. Sparsam bedeutet dabei, mit einer geringst möglichen Zahl an Bits auszukommen, d.h. die Zahl der benötigten Bits soll den Informationsgehalt der Quelle (in bits) nicht überschreiten. Diese komprimierende Codierung erfolgt durch Verringerung bzw., wenn möglich, vollständige Entfernung der Redundanz.

§ 994 Eine andere Form der Codierung, die Kanalcodierung, expandiert diesen komprimierten Code wieder: im optimal komprimierten Code können Fehler weder erkannt noch ausgebessert werden. Hier führt die Kanalcodierung, in Abhängigkeit von den Eigenschaften des Übertragungskanal, gezielt Redundanzen ein, die bei minimaler Expansion des Codes eine maximale Fehlererkennung und -korrektur ermöglichen sollen.

Definition 4 *Bei der Quellencodierung geht es darum, die Signale einer Quelle in Abhängigkeit von den Eigenschaften dieser Quelle so in einen Code umzusetzen, dass mit möglichst wenigen Bit möglichst viele bit ausgedrückt werden.*

6.3.1 Präfix-Code und Decodierbarkeit

§ 995 Ein Codierungsverfahren, das allgemein bekannt ist, ist der ASCII-Code (vgl. Tab. 6.2), der mit 7 (bzw. in der neueren Form 8) Bits (Bit mit großem B als Binärzeichen, nicht zu verwechseln mit bit mit kleinem b als Maß für den Informationsgehalt) die Zeichen einer Schreibmaschinen- bzw. Computertastatur darstellt. Hierbei handelt es sich um ein typisches Beispiel für einen Blockcode, d.h. die einzelnen Zeichen werden unabhängig von ihrer Häufigkeit stets mit der gleichen Anzahl von Bits codiert. Blockcodierung ist für die Datenverarbeitung aufgrund der stets gleichen Länge von Zeichen besonders gut geeignet. Denkt man jedoch an die Speicherung und Übertragung von Information, so zeigt die Blockcodierung

Tabelle 6.2: ASCII-Code

000	NUL	033	!	066	B	099	c	132	ä	165	ñ	198	ä	231	p
001	Start Of Header	034	"	067	C	100	d	133	å	166	o	199	Å	232	q
002	Start Of Text	035	#	068	D	101	e	134	ä	167	°	200	ä	233	r
003	End Of Text	036	\$	069	E	102	f	135	ç	168	º	201	å	234	u
004	End Of Transmission	037	%	070	F	103	g	136	è	169	¸	202	ä	235	ü
005	Enquiry	038	&	071	G	104	h	137	é	170	˘	203	å	236	ý
006	Acknowledge	039		072	H	105	i	138	ê	171	½	204	å	237	ÿ
007	Bell	040	(	073	I	106	j	139	í	172	¾	205	å	238	–
008	Backspace	041	)	074	J	107	k	140	î	173	¿	206	å	239	·
009	Horizontal Tab	042	*	075	K	108	l	141	ï	174	«	207	å	240	–
010	Line Feed	043	+	076	L	109	m	142	Ä	175	»	208	å	241	±
011	Vertical Tab	044	,	077	M	110	n	143	Å	176	…	209	å	242	–
012	Form Feed	045	-	078	N	111	o	144	Æ	177	…	210	å	243	¼
013	Carriage Return	046	.	079	O	112	p	145	æ	178	■	211	å	244	¶
014	Shift Out	047	/	080	P	113	q	146	Æ	179	…	212	å	245	§
015	Shift In	048	0	081	Q	114	r	147	ö	180	…	213	å	246	–
016	Delete	049	1	082	R	115	s	148	ó	181	À	214	å	247	–
017	-- frei --	050	2	083	S	116	t	149	ô	182	Á	215	å	248	*
018	-- frei --	051	3	084	T	117	u	150	ù	183	Â	216	å	249	–
019	-- frei --	052	4	085	U	118	v	151	ú	184	Ë	217	å	250	–
020	-- frei --	053	5	086	V	119	w	152	ÿ	185	Ì	218	å	251	*
021	Negative Acknowledge	054	6	087	W	120	x	153	Ö	186	…	219	å	252	*
022	Synchronous Idle	055	7	088	X	121	y	154	Ù	187	…	220	å	253	*
023	End Of Transmission Block	056	8	089	Y	122	z	155	ø	188	…	221	å	254	■
024	Cancel	057	9	090	Z	123	{	156	£	189	…	222	å	255	■
025	End Of Medium	058	:	091	[	124	]	157	€	190	…	223	å		
026	Substitute	059	;	092	\	125	^	158	…	191	…	224	å		
027	Escape	060	<	093	]	126	~	159	…	192	…	225	å		
028	File Separator	061	=	094	^	127	o	160	ä	193	…	226	å		
029	Group Separator	062	>	095	_	128	ç	161	í	194	…	227	å		
030	Record Separator	063	?	096	`	129	ü	162	ó	195	…	228	å		
031	Unit Separator	064	@	097	a	130	é	163	ú	196	…	229	å		
032		065	A	098	b	131	ä	164	ñ	197	…	230	å		

Tabelle 6.3: Zwei Codes für einen vierelementigen Zeichenvorrat

Zeichen	Wahrscheinlichkeit	Code 1	Code 2
a	1/2	00	0
b	1/4	01	10
c	1/8	10	110
d	1/8	11	111

eine deutliche Schwäche: im Mittel sind wesentlich mehr Bits zur Informationsdarstellung aufzuwenden, als vom Informationsgehalt her notwendig wären.

§ 996 Daher versucht man, Codes zu entwickeln, in denen die einzelnen Zeichen unterschiedliche Längen haben, wobei die häufigsten Zeichen die geringste Länge haben. Zur Illustration betrachten wir dazu den vierelementigen Zeichenvorrat A, wie in Tabelle 6.3 dargestellt. Bei den beiden dort vorgeschlagenen Codierungsmöglichkeiten handelt es sich um einen Blockcode der Länge zwei (Code 1) und einen Code mit unterschiedlichen Längen der Codewörter (Code 2). Der mittlere Informationsgehalt der Zeichen ergibt sich nach (6.3) zu

$$H = \frac{1}{2} \text{ld}(2) + \frac{1}{4} \text{ld}(4) + \frac{1}{8} \text{ld}(8) + \frac{1}{8} \text{ld}(8) = 1.75 \text{ bit} .$$

Das ist nach Shannon und Weaver [223] auch die minimale Anzahl von Bits, die bei einer Codierung pro Zeichen benötigt werden. Im Code 1 (Blockcode) ist die Menge der Bits, die für die Darstellung eines Zeichens benötigt werden (Elementarzeichenbedarf) für jedes Zeichen gleich 2, im Code 2 liegt der Elementarzeichenbedarf je nach Zeichen zwischen 1 und 3. So wie sich der mittlere Informationsgehalt durch Mittelwertbildung über alle Zeichen ergibt, so errechnet sich der mittlere Elementarzeichenbedarf als der Mittelwert des Elementarzeichenbedarfs über alle Zeichen. Dieser mittlere Elementarzeichenbedarf m ist bei Code 1 gleich 2, bei Code 2 dagegen ist der Elementarzeichenbedarf eines Zeichens gleich seinem Informationsgehalt. Der mittlere Elementarzeichenbedarf ist daher auch gleich dem mittleren Informationsgehalt, d.h. $m=H=1.75 \text{ bit}$. Diese Form der Codierung wird als Quellencodierung bezeichnet, da die Zeichen so behandelt werden, wie sie von der Datenquelle geliefert werden, d.h. die Datenquelle und deren Symbolstatistik bestimmen den Code.

§ 997 Die Güte eines Codierungsverfahrens lässt sich durch die Redundanz bestimmen. Nach der Definition der Redundanz in (6.4) und Einsetzen des mittleren Elementarzeichenbedarfs m lässt sich der mittlere Mehraufwand je Zeichen beschreiben als die Redundanz des Codes, d.h.

$$R = m - H .$$

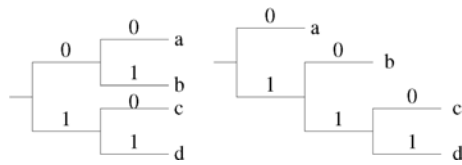


Abbildung 6.15: Codierbäume für die Codes aus Tabelle 6.3

Zeichen	p	P	Block	Shannon	Huffman	Fano
a	0.4	0	000	00	0	00
b	0.2	0.4	001	011	100	01
c	0.15	0.6	010	100	101	10
d	0.15	0.75	011	110	110	110
e	0.05	0.9	100	11100	1110	1110
f	0.05	0.95	101	11110	1111	1111
$H = 2.246$			$m = 3$	$m = 2.8$	$m = 2.3$	$m = 2.35$

Tabelle 6.4: Beispiele für Redundanzreduktion durch verschiedene Codes

Die relative Redundanz ist dann der Mehraufwand des Codes bezogen auf den tatsächlichen Gesamtaufwand:

$$r = \frac{R}{m} = \frac{m - H}{m} = 1 - \frac{H}{m} = 1 - e_f,$$

worin der Quotient H/m auch als die Effizienz e_f eines Codes bezeichnet wird.

Definition 5 *Verlustfreie Datenkompression bedeutet Redundanzreduktion.*

§ 998 Zwar haben wir mit Code 2 die Redundanz reduziert, jedoch sind die einzelnen Zeichen jetzt unterschiedlich lang. Was passiert aber in einem solchen Code, wenn wir verschiedene Zeichen miteinander verknüpfen, d.h. hintereinander schreiben? Bei Blockcodes sind die Zeichen aufgrund der konstanten Zeichenlänge bei der Decodierung einfach voneinander zu trennen, bei unterschiedlichen Wortlängen dagegen ist dieses Decodierungsverfahren nicht sofort eindeutig. Betrachten wir dazu nochmals den Code 2 und geben dem Zeichen b statt des Codes 10 den Code 01. Dann wären zwar weiterhin alle Codezeichen unterschiedlich, allerdings wäre die Decodierbarkeit nicht mehr gegeben. Betrachte dazu die Zeichenfolge 011110: diese könnte mit dem veränderten Code sowohl als 'ada' decodiert werden als auch als 'bc'. Diese Codierung wäre also nicht eindeutig, da der Empfänger die gesendete Information nicht vollständig zurückgewinnen könnte.

§ 999 Code 2 in der in Tabelle 6.4 gegebenen Form ist daher so konstruiert, dass derartige Mehrdeutigkeiten nicht auftreten können. Der Code ist ein Präfix-Code, d.h. kein Codewort ist der Anfang (Präfix) eines anderen. Diese Eigenschaft zieht die eindeutige Decodierbarkeit unmittelbar nach sich. Die Umkehrung gilt nicht, d.h. die Präfix-Eigenschaft ist hinreichend aber nicht notwendig für die eindeutige Decodierbarkeit. Am Codierbaum (vgl. Abb. 6.15) zeigt sich die Eigenschaft der Decodierbarkeit dadurch, dass die Zeichen nur an den Zweigenden des Baumes sitzen, nicht jedoch in den Verzweigungen.

§ 1000 Präfix-Codes unterschiedlicher Länge werden in der Praxis häufig zur Redundanzreduktion angewendet. So wird z.B. bei der Festlegung von Befehlssätzen (z.B. Maschinensteuerung, Betriebssystem eines Computers) darauf geachtet, dass die häufig vorkommenden Befehle möglichst kurz sind, während seltener auftretende Befehle länger sein dürfen. Die Festlegung von Steuerzeichen in der Datenübertragung folgt den gleichen Regeln.

6.3.2 Redundanzsparende Codes

§ 1001 Für die drei folgenden Codierungsverfahren verwenden wir als Beispiel die in Tabelle 6.4 angegebenen sechs Zeichen a, b, c, d, e und f. In der allgemeinen Form besteht der zugrunde gelegte Zeichenvorrat aus n Zeichen mit den Wahrscheinlichkeiten p_1, p_2, \dots, p_n . Allen

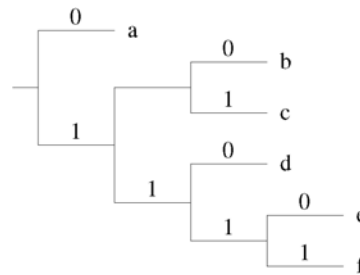


Abbildung 6.16: Codierbaum zum Huffman-Code der in Tabelle 6.3 gegebenen Zeichen

in diesem Abschnitt zu besprechenden Codierungsverfahren ist gemeinsam, dass sie Präfix-Codes sind, bei denen die Wortlänge mit abnehmender Wahrscheinlichkeit des Auftretens des Zeichens zunimmt.

Shannon Code

§ 1002 Für die Codierung nach Shannon werden diese Zeichen nach abfallenden Wahrscheinlichkeiten ihres Auftretens geordnet:

$$p_1 \geq p_2 \geq p_3 \geq \dots \geq p_n .$$

Mit P_k sei nun die kumulierte Wahrscheinlichkeit aller Zeichen, die vor dem k-ten Zeichen liegen, bezeichnet, d.h.

$$P_k = p_1 + p_2 + \dots + p_{k-1} .$$

Die Dualzahldarstellung von P_k liefert das Code-Wort für das k-te Zeichen. Die genaue Festlegung des Code-Wortes geschieht nach folgenden Regeln:

1. Die Codewortlänge m_k des k-ten Zeichens genügt den Ungleichungen

$$- \text{ld}(p_k) \leq m_k < 1 - \text{ld}(p_k) \quad (6.6)$$

oder anders ausgedrückt: m_k ist die kleinste ganze Zahl, für die gilt

$$\frac{1}{2^{m_k}} \leq p_k . \quad (6.7)$$

2. Die Entwicklung der Zahl P_k in eine Dualzahl wird nach der m_k -ten Stelle abgebrochen, der Koeffizient der Entwicklung stellt das gesuchte Codewort dar. Das gesuchte Codewort für das k-te Zeichen ist dann durch die Binärzeichen $b_1, b_2, b_3, \dots, b_m$ in der Form $b_1 b_2 b_3 \dots b_m$ gegeben, so dass die Zahl

$$Z_k = b_1 \cdot 2^{-1} + b_2 \cdot 2^{-2} + \dots + b_m \cdot 2^{-m} \quad (6.8)$$

möglichst gross wird, aber immer noch kleiner als P_k ist, d.h. es gilt

$$P_k - 2^{-m} < Z_k \leq P_k . \quad (6.9)$$

§ 1003 Der Shannon-Code ist ein Präfix-Code. Damit ist er auch eindeutig decodierbar. In Tabelle 6.3 ist die Codierung nach Shannon auf das Beispiel unseres eingangs erwähnten Zeichenvorrats mit sechs Zeichen angewandt. Die Redundanzreduktion ist erkennbar, die beiden anderen in der Tabelle angegebenen Codierungsverfahren weisen jedoch eine größere Redundanzreduktion auf. Dennoch erlaubt der Shannon-Code eine beliebig gute Approximation an die ideale und damit redundanzfreie Codierung (s.u.).

Huffmann Code

§ 1004 Für die Codierung nach Huffman bedient man sich ebenfalls der Ordnung der Zeichen nach fallenden Wahrscheinlichkeiten. Die Codewörter werden dann mit Hilfe eines Codierbaumes bestimmt. Da es sich um einen Präfix-Code handelt entspricht jedes Zeichen einem der n Endzweige des Codierbaumes.

§ **1005** Die Codierung beginnt mit den Zeichen geringster Häufigkeit (vgl. den Codierbaum in Abb. 6.16, der sich auf das Beispiel in Tabelle 6.4 bezieht). Wähle zunächst die beiden seltensten Zeichen aus (im Beispiel e und f). Die zugehörigen Codewörter werden dann in der letzten Stelle durch die Bits 0 und 1 unterschieden. Die beiden seltensten Zeichen werden damit zu den Endpunkten einer Verzweigung im Codierbaum. Diese Verzweigung entspringt in einem Zweig, der von nun an als Endzweig gilt. Diesem Zweig ordnen wir die Wahrscheinlichkeit zu, die sich aus der Summe der Wahrscheinlichkeiten der beiden abgehenden Zweige ergibt. Die zwei seltensten Buchstaben (e und f) werden dabei also zu einem neuen Zeichen (ef) zusammengefasst, das eine Wahrscheinlichkeit von $0.05 + 0.05 = 0.1$ hat. Die obige Betrachtung wird für einen Codierbaum wiederholt, der nur noch $n - 1$ Endzweige hat. Dabei fasst man wieder die beiden seltensten Endzweige zusammen (das sind in dem Beispiel d und der bereits zusammengefasste ef-Zweig). Auf diese Weise arbeitet man sich von den Endzweigen bis zur Wurzel des Codierbaumes vor.

Codierung nach Fano

§ **1006** Die Codierung nach Fano ist von der Idee her eine Umkehrung der Codierung nach Huffman: hier geht man von der Baumwurzel aus und hangelt sich zu den Zweigen vor. Die erste Verzweigung entspricht dabei einer Aufteilung des Zeichenvorrates in zwei Mengen mit möglichst gleich großen Wahrscheinlichkeiten. Die eine Menge enthält dabei die wahrscheinlicheren Zeichen, die andere die unwahrscheinlicheren. Auf diese Weise ist das am weitesten links stehende Bit der Codierung festgelegt. Die beiden Äste der Verzweigung werden nun als Wurzeln für Codierbäume der beiden Untermengen aufgefasst.

§ **1007** Betrachtet man für die Codierung nach Fano noch einmal das Beispiel in Tabelle 6.4, so ergeben sich zwei Möglichkeiten der Codierung: Die erste Aufspaltung in je eine Unterliste mit wahrscheinlicheren und unwahrscheinlicheren Zeichen kann wahlweise zwischen dem b und dem c erfolgen oder zwischen dem a und dem b (in beiden Fällen ist die Wahrscheinlichkeit in der einen Untermenge 0.6 und in der anderen 0.4). Im ersten Falle ergibt sich der in Tabelle 6.4 gegebene Fano-Code, im zweiten Falle hätte sich der ebenfalls in Tabelle 6.4 gegebene Huffman-Code ergeben.

6.3.3 Fundamentalsatz der Quellencodierung

§ **1008** Die Fano-Codierung beseitigt die Redundanz einer Zeichenquelle nur dann völlig, wenn sich die Zeichen der Quelle zur eindeutigen Identifizierung immer in zwei gleichwahrscheinliche Hälften teilen lassen (das war im Beispiel in Tabelle 6.3 der Fall, nicht jedoch in dem Beispiel in Tabelle 6.4). Lässt sich die Redundanz auch in den Fällen beseitigen, in denen diese Voraussetzung nicht gegeben ist?

§ **1009** Auch in diesem Falle lässt sich die Redundanz durch geeignete Codierung beliebig reduzieren [78, 222], die entscheidende Idee dabei ist, nicht die einzelnen Zeichen zu codieren, sondern Zeichen x_i zu Zeichenketten X der Länge N zusammenzufassen. Diese Zeichenketten werden dann codiert. Die Quelle habe dazu n voneinander unabhängige Zeichen, die mit den Wahrscheinlichkeiten p_i erzeugt werden. Die Wahrscheinlichkeit p einer aus dieser Quelle erzeugten zusammengesetzten Zeichenkette ist dann näherungsweise gegeben durch

$$p = \prod_{i=1}^n p_i^{N p_i} . \quad (6.10)$$

Für den in der Zeichenkette enthaltenen Informationsgehalt gilt damit

$$-\text{ld}(p) = -\sum_{i=1}^n N p_i \text{ld}(p_i) = -N \sum_{i=1}^n p_i \text{ld}(p_i) = N H(X) .$$

Entsprechend ist die Wahrscheinlichkeit jeder dieser Zeichenketten ungefähr gegeben durch

$$p = 2^{-N H(X)} ,$$

wobei die Wahrscheinlichkeiten für jede Zeichenkette ungefähr gleich groß sind.

Verständnisfrage 41 Gleichung (6.10) ist eine Näherung. Stellen Sie die exakte Formulierung auf und begründen Sie die Näherung. Unter welchen Annahmen gilt letztere.

§ **1010** Die Gesamtwahrscheinlichkeit dieser Zeichenketten kann durch eine genügend große Länge N beliebig nahe an 1 gebracht werden; daher muss die Anzahl dieser annähernd gleich wahrscheinlichen Zeichenketten ungefähr gleich $2^{NH(X)}$ sein, es werden also $NH(X)$ bit benötigt, um anzugeben, welche von diesen Zeichenketten vorliegt. Auf jedes der N Zeichen einer derart codierten Zeichenkette entfallen dann nur $H(X)$ bit anstelle der $H_0(X) = \text{ld}N$ bit.

§ **1011** Andererseits sind diese $2^{NH(X)}$ annähernd gleich wahrscheinlichen Zeichenketten nur ein kleiner Bruchteil aller n^N Zeichenketten der Länge N . Ihr relativer Anteil ist gegeben durch

$$\frac{n^N}{2^{NH(X)}} = 2^{N(\text{ld}(n) - H(X))}.$$

Diese zahlreicheren, fast n^N Zeichenketten lassen sich mit jeweils $N \text{ld}(n) \geq NH(X)$ bit codieren. Da aber die Gesamtwahrscheinlichkeit dieser vielen Zeichenketten durch eine ausreichend lange Wortlänge N beliebig klein gemacht werden kann, tragen sie nur vernachlässigbar wenig zum mittleren Zeichenbedarf bei. Daraus ergibt sich der Fundamentalsatz der Quellencodierung:

Definition 6 *Fasst man eine zu codierende Nachricht in genügend langen Zeichenfolgen zusammen, dann lassen sich diese so codieren, dass die Redundanz beliebig klein wird.*

§ **1012** Die hierbei eingeführten Zeichenketten müssen ziemlich lang sein, damit ihre Gesamtwahrscheinlichkeit ausreichend gewährleistet ist. Damit müssen viele Quellzeichen zu einer Zeichenkette zusammengefasst werden, was auf lange Codewörter führt. Damit zeigt sich auch eine Voraussetzung des Verfahrens: Die Originalnachrichten müssen eine ausreichende Länge haben.

6.3.4 Lempel-Ziv-Quellencodierung

§ **1013** Huffman-Codes sind optimale Codes – allerdings nur unter der Voraussetzung, dass die Wahrscheinlichkeiten der Signale der Quelle (Quellenstatistik) bekannt sind. Will man einen Text aus einer bekannten Sprache codieren, so ist dessen Quellenstatistik bekannt.

§ **1014** Anders sieht die Situation jedoch bei unbekanntem Daten aus. Eine mit einem Imager aufgenommene Szene ordnet jedem Pixel einen von 255 möglichen Helligkeitswerten zu – aber welche Verteilung haben die Helligkeitswerte? Meeresoberfläche bei Nacht, Prärie im Mittelwesten oder die Sahara werden sicherlich jeweils unterschiedliche Histogramme der Helligkeitswerte liefern, also auch unterschiedliche Quellenstatistik haben. Dann benötigt jede dieser Szenen einen eigenen Huffman-Code – oder man muss sehr verschwenderisch über alle möglichen Szenen mitteln und aus dieser Quellenstatistik einen zwar für den Gesamtdatensatz optimierten, für jede einzelne Szene jedoch suboptimalen Code entwickeln.

§ **1015** In solchen Fällen ist ein von der Quellenstatistik unabhängiger Codierungsalgorithmus hilfreich. Der Lempel-Ziv-Algorithmus ist ein Beispiel für einen derartigen universellen Quellencodierungsalgorithmus. Lempel-Ziv ist ein Variabel-zu-Festlänge-Codierungssystem: eine Sequenz der Quellen wird in Phrasen variierender Länge unterteilt, die ihrerseits jedoch in Codewörter gleicher Länge codiert werden.

§ **1016** Was bestimmt aber die Länge einer Phrase? Die Gliederung erfolgt durch die Identifikation von Phrasen der kleinsten Länge, die bisher noch nie aufgetreten sind. Nach Beginn einer Phrase wird erst dann wieder eine neue Phrase begonnen, wenn das gerade ausgegebene

Wörterbuchposition	Phrase	Codewort	Tabelle 6.5: Beispiel zum Lempel-Ziv-Algorithmus [188]	
1	0001	0	0000	0
2	0010	1	0000	1
3	0011	00	0001	0
4	0100	001	0011	1
5	0101	10	0010	0
6	0110	000	0011	0
7	0111	101	0101	1
8	1000	0000	0110	0
9	1001	01	0001	1
10	1010	010	1001	0
11	1011	00001	1000	1
12	1100	100	0101	0
13	1101	0001	0110	1
14	1110	0100	1010	0
15	1111	0010	0100	0
16		1110	1	

Zeichen dazu führt, dass die so entstandene Phrase nicht mehr mit einer bereits bekannten Phrase übereinstimmt. Führt das letzte Zeichen dazu, dass sich die so entstandene Phrase von den vorher bekannten unterscheidet, so wird sie als neue Phrase erkannt: eine neue Phrase ist also die Verkettung aus einer bekannten Phrase und einem neuen Quellenausgang. Um diese zu codieren werden binäre Expansionen der lexikographischen Ordnung der bisherigen Phrase mit dem neuen Bit verkettet. Auf diese Weise wachsen die Phrasen.

§ **1017** Betrachten wir das Ausgangssignal

0100001100001010000010100000110000010100001001001

Dieses Signal wird in Phrasen gegliedert:

0||1||00||001||10||000||101||0000||01||010||00001||100||0001||0100||0010||01001

Zur Codierung dieser 16 Phrasen benötigen wir jeweils 5 Bit (4 Bit für die Phrase sowie ein zusätzliches Bit für den neuen Quellenausgang). Die Codierung ist in Tabelle 6.5 gegeben.

§ **1018** Aus diesem Beispiel wird der Vorteil des Algorithmus nicht deutlich, da die ursprüngliche Sequenz von 49 Zeichen (entsprechend 49 Bit) in 16 Phrasen zerlegt und daher mit 80 Bit codiert wurde. Dieses Phänomen erklärt sich aus der Kürze der Testsequenz, bei einer längeren Testsequenz komprimiert der Algorithmus wesentlich besser.

§ **1019** Lempel-Ziv ist die Grundlage vieler Datenpacker, z.B. ZIP, ZOO, ARJ usw. Modifikationen von Lempel-Ziv werden auch bei der Kompression von Bildern verwendet, vgl. Abschn. 7.4.1. Die Erfahrung mit diesen Packern bestätigt die Abhängigkeit der Effizienz von der Länge des Signals: kleine Dateien lassen sich kaum komprimieren während die Datenreduktion bei großen Dateien erheblich ist. Um überhaupt ein Gefühl für die Abhängigkeit von der Signallänge zu entwickeln, können Sie in Anh. 9.1 mit einem Signal spielen.

6.3.5 Historisches Beispiel: Redundanzreduktion beim Fernkopieren

§ **1020** Fernkopieren (Faxen; mittlererweile auch schon eine eher historische Technologie) ist eine Form der Datenübertragung, die sich sehr leicht und sehr Platz sparend codieren lässt. Die vollständige Information des Bildes ergibt sich aus der Zahl der zu seiner Darstellung benötigten Pixel (Punktauflösung, vgl. Abb. 6.14) und der Angabe, ob der jeweilige Bildpunkt

schwarz oder weiß ist. Die Information wäre also insgesamt gleich der Zahl der Bildpunkte (die Information schwarz oder weiß entspricht ja genau der Information von einem bit pro Pixel). Im Gegensatz zu einer farbigen Darstellung hat man beim Schwarz-Weiß-Bild aber den Vorteil, dass die Farbe von Bildpunkt zu Bildpunkt nur relativ selten wechselt. Das gilt für sehr feine Auflösung (Raster) natürlich noch stärker als für grobe Raster (vgl. Abb. 6.14).

§ **1021** Bei der Lauflängencodierung wird jede Punktfolge bestimmter Farbe und Länge (run length, Lauflänge) als Wort eines Zeichenvorrates aufgefasst. Jede Bildzeile ist dann eine Folge solcher Lauflängen. Die Lauflängen werden binäre codiert, wobei jede schwarze und jede weiße Lauflänge ein eigenes Codewort erhält. Die Wahl der Codewörter geschieht so, dass der mittlere Binärzeichenbedarf je Lauflänge möglichst gering wird. Dafür verwendet man Redundanz sparende Codes, z.B. die Codierung nach Huffman oder eine Variante davon, die sogenannte modifizierte Huffman-Codierung. Je nach Bildvorlage sind dann nur noch 5 bis 20% des Aufwandes gegenüber der Punkt-für-Punkt-Übertragung nötig. Einige Beispiele für den modifizierten Huffman-Code zur Bildübertragung sind [212]:

```
s1 → 010
s2 → 11
s3 → 10
s4 → 011
... → ...
w6 → 1110
w7 → 1111
w8 → 10011
w9 → 10100
... → ...
```

§ **1022** Stellen wir uns jetzt eine aus 33 Zeichen bestehende Zeile vor. Die Schwarz-Weiß-Folge dieser Zeile ist gegeben durch

```
00000000110000000111100000000111
```

wobei die 0 einen weißen, die 1 einen schwarzen Bildpunkt markiert. In Lauflängen lässt sich die Folge dann beschreiben als w8, s2, w7, s4, w9 und s3. Mit dem oben gegebenen modifizierten Huffman-Code lässt sich dies verschlüsseln zu der Bitfolge

```
100111111110111010010.
```

Im Verhältnis zur ursprünglichen Folge fällt die Verkürzung hier natürlich noch nicht besonders beeindruckend aus (21 Bit statt der ursprünglich 33 Bit), das liegt aber im wesentlichen daran, dass im Verhältnis zu einer ‘realen’ Fax-Vorlage die Lauflängen im obigen Beispiel recht kurz waren.

§ **1023** Auch wenn das Faxen eine recht anachronistische Variante der Datenübertragung ist – die Einfachheit der Codierung macht uns noch einmal deutlich, dass eine effiziente Codierung nicht nur bei Sprache sondern auch bei anderen Signalen stets auch den (Sinn-)Zusammenhang benachbarter Zeichen berücksichtigt – außer den Wahrscheinlichkeiten werden auch bedingte Wahrscheinlichkeiten oder Übergangswahrscheinlichkeiten benötigt.

6.4 Kanalcodierung

§ **1024** Bisher haben wir uns damit befasst, wie man Information möglichst ökonomisch verpacken kann, um bei einer Speicherung oder Übertragung dieser Informationen Platz bzw. Zeit zu sparen. Im Interesse der Datenkompression wurde also Redundanz so weit wie möglich ausgeschaltet. Im Folgenden werden wir lernen, dass man andererseits dem so codierten

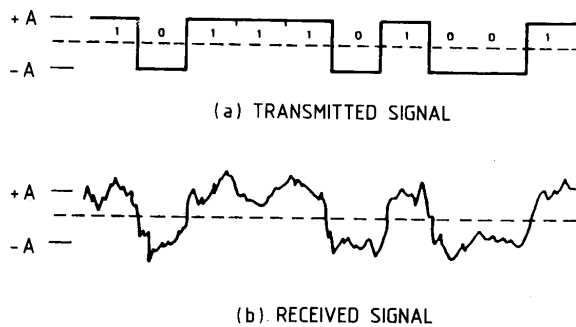


Abbildung 6.17: Binärsignal 1011101001 am Sender (oben) und beim Empfänger (unten) für einen gestörten Übertragungskanal [17]

Signal wieder Redundanzen zufügt, um eine Fehlererkennung und möglichst auch -korrektur zu ermöglichen.

6.4.1 Informationsübertragung

§ 1025 Dabei stellt sich die Frage: Lohnt sich der Aufwand, Redundanzen zur Fehlererkennung zuzufügen (um den Preis einer wesentlich aufwendigeren = teureren Datenübertragung), oder ist die Fehlerwahrscheinlichkeit bzw. -häufigkeit so gering, dass wir die vereinzelt auftretenden Fehler in Kauf nehmen können? Diese Frage wird durch die Eigenschaften des Übertragungskanals zwischen einem Raumfahrzeug, insbesondere einer planetaren Mission (z.B. Voyager), unmittelbar deutlich: große Abstände zwischen Sender und Empfänger bei gleichzeitiger geringer Sendeleistung führen zu einem geringen Signal-Rausch-Verhältnis, d.h. die Wahrscheinlichkeit eines Übertragungsfehlers wird entsprechend groß.⁶ Zusätzlich ist, für jedes Raumfahrzeug und damit auch für jeden Satelliten, die Atmosphäre mit ihren hochgradig variablen Eigenschaften ein Bestandteil des Übertragungskanals. Dabei kann die Störung der Ionosphäre durch die zusätzliche Ionisation in der Folge eines Flares die Datenübertragung ausgerechnet zu den Zeiten stark beeinträchtigen, in denen die für die Sonnenforscher interessantesten Daten von den Satelliten gesendet werden.

§ 1026 Ein Beispiel für die Relation zwischen gesendeten und empfangenen Daten ist in Abb. 6.17 gezeigt. Im oberen Teil ist ein Binärsignal in ungestörter Form aufgetragen, im unteren Teil das sich bei einem gestörten Kommunikationskanal am Empfänger ergebende Signal. Man erkennt dabei das Risiko, dass bei starken Störungen einzelne Bits oder gar Folgen von Bits falsch identifiziert werden. Insbesondere starke Störungen durch erhöhte Ionisation oder starken Regen sind im Verhältnis zu den Übertragungszeiten sehr lange andauernd, so dass es hierbei häufig zu einer Verfälschung langer Folgen von Bits kommen kann [190].⁷

§ 1027 Wie lässt sich Informationsübertragung beschreiben? Im einfachsten Falle haben der Sender und der Empfänger den gleichen Zeichensatz und für jedes vom Sender ausgewählte, codierte und gesendete Zeichen kann der Empfänger dieses Zeichen unverfälscht erhalten (ungestörte Übertragung), decodieren und identifizieren. Im realen Fall dagegen wird diese

⁶Die Kommunikation mit einer Raumsonde ist ein eher extremes Beispiel für die Kommunikation über gestörte Kanäle. Ein wesentlich alltäglicheres Beispiele sind die Kommunikation über eine analoge Telefonleitung: wird diese von Mensch zu Mensch durchgeführt, so ist der Mensch auf Grund der großen in der Sprache enthaltenen Redundanz in der Regel in der Lage, die gestörte Nachricht (annähernd) korrekt zu dekodieren. Kommunizieren jedoch zwei Modems digitale Information über diese gestörte Telefonleitung, so lässt sich dies ebenfalls durch Abb. 6.17 beschreiben. Andere Beispiele für die Kommunikation über gestörte Kanäle sind die Übertragung der in der DNA enthaltenen Information von der Mutter- auf die Tochterzelle bei der Zellteilung oder ein Diskettenlaufwerk. Da die Information mit dem gleichen Laufwerk geschrieben und auch gelesen werden kann, soll das Beispiel daran erinnern, dass Kommunikation nicht zwingend räumliche Distanzen überbrücken muss sondern manchmal auch zeitliche.

⁷Im Falle einer über einen längeren Zeitraum stark verfälschten Sequenz, d.h. die Wahrscheinlichkeit zum Klappen eines Bits ist hoch, ist eine Korrektur kaum noch möglich. Eine Fehlererkennung sollte aber dennoch zu realisieren sein – damit kann gegebenenfalls eine Wiederholung der Datenübertragung gefordert werden. Wir werden uns im Folgenden bei Fehlererkennung und -korrektur auf statistische Fehler mit kleinen Wahrscheinlichkeiten p eines Bitfehlers beschränken.

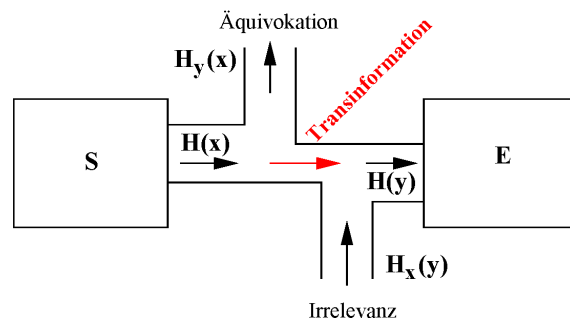


Abbildung 6.18: Entropiefluss im gestörten Übertragungskanal, basierend auf [228]

Übertragung nicht ungestört erfolgen, so dass die Decodierung und Identifizierung schwierig oder gar unmöglich werden kann.

§ 1028 Abbildung 6.18 stellt dazu den Entropiefluss in einem gestörten Nachrichtenkanal dar. Der Sender gibt aus seinem Zeichenvorrat X Signale mit einer mittleren Information ab, auch als Sender-Entropie $H(X)$ bezeichnet. Der Empfänger wählt daraufhin aus seinem Zeichenvorrat Y ein Zeichen mit der Empfänger-Entropie $H(Y)$. Wegen möglicher Störungen verbleibt ihm dabei aber eine mittlere Unkenntnis $H_Y(X)$ über das Gesendete. Diese Unkenntnis wird als Äquivokation bezeichnet. Andererseits lassen Störungen aber auch eine mittlere Unsicherheit bei der Auswahl der Empfängerzeichen für ein beliebiges gesendetes Zeichen zurück. Diese Unvorhersagbarkeit wird als Irrelevanz $H_X(Y)$ bezeichnet. Die im Mittel pro Zeichen übertragene Information wird dann als mittlere Transinformation bezeichnet.

6.4.2 Kanalkapazität

§ 1029 Bisher haben wir die Signale als diskrete Zeichen betrachtet und uns nur mit ihrer Codierbarkeit und Decodierbarkeit beschäftigt. Bei realen Nachrichten handelt es sich jedoch um Signalfolgen, d.h. Signale, die in einer bestimmten Zeit gesendet werden. Bei der Nachrichtenübertragung ist daher gerade die Geschwindigkeit, mit der Information übertragen werden kann, eine wichtige Kenngröße. Diese bildet z.B. die Motivation zur Quellencodierung, d.h. zur Verringerung der Redundanzen in einer Nachricht. Sie bildet gleichzeitig auch eine Grenze für die Kanalcodierung, d.h. das Einfügen von Redundanzen zur Fehlererkennung und -korrektur.

§ 1030 Die Geschwindigkeit der Nachrichtenübertragung lässt sich definieren als der Informationsfluss (Einheit bps, bit pro Sekunde)

$$F = \frac{H}{T_m}.$$

Darin ist

$$T_m = \sum p_x T_x$$

die mittlere Zeit, die für die Übertragung eines Nachrichtensymbols benötigt wird (Einheit s/Symbol).

§ 1031 Unter der Kanalkapazität verstehen wir nun den maximalen Informationsfluss, der über einen gegebenen Nachrichtenkanal fehlerfrei übertragen werden kann:

$$C = F_{\max} = \left(\frac{H}{T_m} \right)_{\max}.$$

Die maximale Kanalkapazität ist alleine durch die Eigenschaften des Übertragungskanals gekennzeichnet nicht aber durch die Eigenschaften der Signalquelle, da wir deren Redundanz freie Codierung bereits vorausgesetzt haben: diese können wir Redundanz frei codieren, wie im vorangegangenen Abschnitt gezeigt. Wir müssen sogar Redundanz frei codieren, da wir sonst nur Kanalkapazität verschwenden würden.

Kanal	B [kHz]	ϱ [dB]	C [bit/s]	Tabelle 6.6: Übertragungskanälen einiger Kanäle
Telefon	3.1	40	$4.1 \cdot 10^4$	
Rundfunk UKW	15	60	$3 \cdot 10^5$	
Fernsehen	5000	45	$7.5 \cdot 10^7$	
InfoAufnahme Mensch			20	

§ **1032** Für einen realen, d.h. gestörten Kanal, gilt der Fundamentalsatz der Kanalcodierung (Shannon):

Definition 7 *Es gibt eine Kanalkapazität C , bei der man bei geeigneter Codierung Informationen mit beliebig kleiner Fehlerrate übertragen kann, solange der Informationsfluss kleiner als C ist. Wenn der Informationsfluss der Quelle die Kanalkapazität übersteigt, ist Informationsverlust unvermeidlich.*

§ **1033** Dieser Satz ist nicht offensichtlich, da man erwarten würde, dass mit zunehmenden Störungen eines Kanals auch die Übertragungsfehler größer werden. Das ist auch solange der Fall, wie man keine besonderen Codierungsmaßnahmen ergreift. Shannons Satz besagt jedoch, dass es stets eine Codierung gibt, mit der man die Fehlerrate beliebig verringern kann, unabhängig davon, wie die Störungen geartet sind. Die Suche nach einem geeigneten Code kann allerdings schwierig werden. Auch geringe Kanalkapazitäten schränken die Möglichkeit, einen Code für verschwindende Fehlerraten zu finden, ein.

§ **1034** Betrachten wir zum Verständnis dieser letzteren Einschränkung einen Übertragungskanal der Bandbreite B , der durch ein Rauschen mit Gaußscher Amplitudenverteilung gestört ist. P_S sei die Leistung des Signals, P_N die des Rauschens am Empfängereingang. Dann ergibt sich für die Kanalkapazität [90]

$$C = B \operatorname{ld} \left(1 + \frac{P_S}{P_N} \right). \quad (6.11)$$

§ **1035** Der Informationsfluss in einem normalen Übertragungskanal (z.B. Telefon, Rundfunk) bleibt in der Praxis meistens weit hinter der Kanalkapazität zurück. Geht man dann in (6.11) auf den Zehnerlogarithmus über, so ergibt sich

$$C \approx \frac{B}{3} 10 \lg \left(1 + \frac{P_S}{P_N} \right) = \frac{B}{3} \varrho.$$

Für $P_S \gg P_N$ ist dann

$$\varrho \approx 10 \lg \left(\frac{P_S}{P_N} \right)$$

das Signal-Rausch-Verhältnis. Gerade bei den planetaren Missionen, wie z.B. Pioneer und Voyager, ist dieses Verhältnis aufgrund der großen Abstände gering, so dass die Kanalkapazitäten gering werden und sich damit auch die Möglichkeiten, einen fehlerunempfindlichen Code zu finden, verringern.

§ **1036** Tabelle 6.6 gibt die Kanalkapazitäten für einige Übertragungskanäle. Dabei fällt auf, dass der Mensch das langsamste Glied in der Kette ist, d.h. Information kann wesentlich schneller übertragen werden, als der Mensch sie verarbeiten kann.

§ **1037** Doch wenden wir uns wieder der Übertragungskapazität eines Nachrichtenkanals zu. Ist bei binärer Übertragung die Wahrscheinlichkeit, dass ein Zeichen verfälscht wird (also 0 statt 1 oder umgekehrt) durch p' gegeben, so ist nach Shannon die Kapazität eines derartigen Kanals gegeben durch

$$C = 1 - b(p') \text{ bit/s}$$

mit b als der Shannon-Funktion wie in (6.2) gegeben.

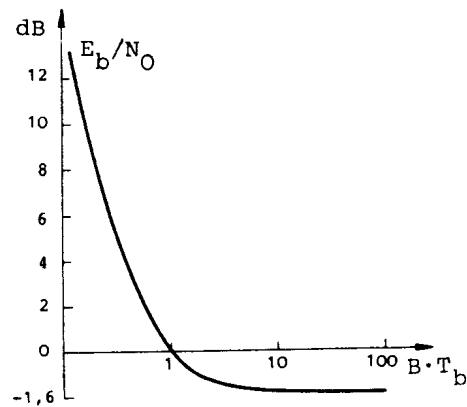


Abbildung 6.19: Shannon-Grenze für fehlerfreien Empfang [90]

§ 1038 Wir können in (6.11) die Leistung P_S des Signals und die Leistung P_N des Rauschens umschreiben, indem wir die Bitzeit T_b , die Bitrate $R_b = 1/T_b$, die spektrale Rauschleistungsdichte N_0 und die Bitenergie E_b einführen [90]. Dann ist

$$\frac{P_S}{P_N} = \frac{P_S T_B R_b}{N_0 B}.$$

Für $C = R_b$, d.h. den optimalen Kanal, wird dann

$$\frac{R_b}{B} = \text{ld} \left(1 + \frac{E_b}{N_0} \frac{R_b}{B} \right).$$

Diese Beziehung zwischen der Energie/Bit und der Bandbreite/Bit ist in Abb. 6.19 dargestellt.

§ 1039 Mit zunehmender Bandbreite B lässt sich dann bei vorgegebenem Verhältnis E_b/N_0 von Bitenergie zu Rauschleistungsdichte eine größere Bitrate R_b erreichen. Im Extremfall geht dabei $B/R_b \rightarrow \infty$ und es wird

$$\frac{E_b}{N_0} = -1.6 \text{ db} \cong 0.69.$$

Das ist die Mindestenergie, die pro Bit und Rauschleistungsdichte aufgebracht werden muss. Für geringere Energien ist eine fehlerfreie Übertragung ausgeschlossen. Dieser Grenzwert gilt übrigens nur für den idealen Codierungsfall (den es zwar gibt, aber der nicht immer bekannt sein muss); für die meisten realen Codierungsverfahren sind diese Anforderungen größer, d.h. es muss mehr Energie zur Übertragung aufgebracht werden.

§ 1040 Aus der Bandbreite und dieser Mindestenergie lässt sich ein Kommunikationswirkungsgrad η_k definieren als

$$\eta_k = \frac{E_b}{N_0 B}.$$

Dieser Wirkungsgrad erlaubt den Vergleich verschiedener Codierungs- und Modulationsverfahren und die Auswahl eines optimalen Verfahrens. Marko [162] gibt einen guten und anschaulichen Überblick über den hier dargestellten Zusammenhang von Information und Energie.

6.4.3 Kanalcodierung: Basics

§ 1041 Bei der Behandlung von Fehlern bei der Informationsübertragung gibt es zwei prinzipiell unterschiedliche Ansätze:

- eine Fehlererkennung ist ausreichend; bei einem erkannten Fehler wird der Sender zur Wiederholung aufgefordert. Dieses Verfahren ist bei vielen Satelliten nicht praktikabel, da die Daten häufig nicht zwischengespeichert sondern direkt ausgelesen werden. dann erlaubt die Fehlererkennung aber zumindest das Ignorieren der fehlerhaften Daten.

- Eine Fehlererkennung alleine ist nicht ausreichend, es wird eine zusätzliche Fehlerkorrektur gefordert. Dieses Verfahren ist zwar aufwendiger, wenn aber keine Wiederholung der als fehlerhaft erkannten Nachricht möglich ist, ist es die einzige Möglichkeit, den Informationsverlust gering zu halten.

Für beide Ansätze gibt es Codierungsverfahren, wobei die Codierung zur Fehlererkennung ohne Korrektur selbstverständlich viel einfacher ist (z.B. durch Verwendung eines Paritätsbits oder einer Prüfzahl, z.B. der Quersumme des Signals) als die Codierung für Fehlererkennung und -korrektur.

§ 1042 Haben wir bisher die Behauptung aufgestellt, dass es stets eine Codierung gibt, mit der die Übertragungsfehler möglichst gering werden können, wollen wir in diesem Abschnitt einige Beispiele für derartige Codierungen betrachten. Diese Kanalcodierung führt zusätzliche Redundanzen ein, wobei gilt:

Definition 8 Ziel der redundanten Codierung ist es, die zuverlässige und sichere Kommunikation über unzuverlässige Kanäle zu ermöglichen.

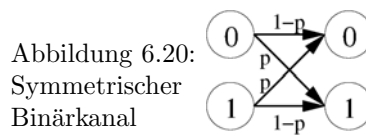
§ 1043 Bei den folgenden Betrachtungen werden wir uns auf Blockcodes beschränken. Das bedeutet, dass die Quellencodierung nicht wie in den obigen Beispielen mit Code-Wörtern variabler Länge erfolgt, sondern mit festen Blocklängen. Für viele Anwendungen bei Weltraumexperimenten kann die Codierung der Quelle durch einen Blockcode durchaus ausreichend sein. Zusätzlich lassen sich aber auch Codes mit Codewörtern variabler Länge in einem Blockcode unterbringen: Man schreibt die Codewörter einfach hintereinander und trennt nach einer gewissen Länge einen Block ab, unabhängig davon, ob dabei ein Codewort zertrennt wird oder nicht.⁸ Zwischen diesen Blöcken befinden sich dann die im Rahmen der Kanalcodierung eingeführten Redundanzen. Da der Empfänger sowohl die Länge der Blöcke als auch die Position der eingefügten Prüfbits inkl. des sie bestimmenden Algorithmus kennt, kann er aus dem empfangenen Signal erst das quellencodierte Signal zurückgewinnen und daraus die Originalnachricht decodieren. Daher stellt die Betrachtung von Blockcodes in diesem Abschnitt keine allgemeine Einschränkung oder gar einen Rückschritt dar.

§ 1044 Etwas formaler können wir einen Blockcode als eine Regel interpretieren, die aus einer Sequenz \vec{s} von Bits einer Quelle eine Sequenz \vec{t} von zu transmittierenden Bits macht. Dabei ist die Länge k der Ausgangssequenz \vec{s} kleiner als die Länge n der transmittierten Sequenz \vec{t} : $k < n$. In einem linearen Blockcode sind die zusätzlichen $m = n - k$ Bits lineare Funktionen der k ursprünglichen Bits; diese Bits werden häufig als Paritätsbits bezeichnet – zumindest im in Abschn. 6.4.6 beschriebenen Hamming(7,4) Code wird diese Bezeichnung offensichtlich.

6.4.4 Kanalcodierung: Fehlererkennung

§ 1045 Beginnen wir mit einfachen Möglichkeiten zur Fehlererkennung. Dazu betrachten wir wieder unseren vierelementigen Zeichenvorrat aus Tabelle 6.3, und zwar in der Blockcodierung wie durch Code 1 gegeben. Die einfachste Methode zur Erzeugung eines Codes, in dem Fehler erkannt werden können, besteht darin, jedes Zeichen einfach noch einmal zu senden (Signalverdoppelung). Durch die Verdoppelung unserer Signale benötigen wir pro Zeichen statt 2 Bit 4 Bit. Gehen wir davon aus, dass bei der Übertragung nur jeweils 1 Bit verfälscht wird, so können wir jeden Fehler erkennen. Fehlermöglichkeiten sind dann jeweils gegeben durch

⁸Bei der Kanalcodierung kann das Signal als Bitfolge ohne Sinnzusammenhang behandelt und damit auch in beliebige Blöcke zerlegt werden: der Sinnzusammenhang ist ja bereits durch die Redundanzreduktion in der Quellencodierung abhanden gekommen.



Zeichen	Code	Codierung	F_1	F_2	F_3	F_4
a	00	0000	1000	0100	0010	0001
b	01	0101	1101	0001	0110	0100
c	10	1010	0010	1110	1000	1011
d	11	1111	0111	1011	1101	1110

wobei die Spalten F_i jeweils den Fehler im i -ten Bit symbolisieren sollen. Jeder einfache Fehler (d.h. es wird nur ein Bit falsch übertragen) wird erkannt, da das fehlerhafte Signal sich nicht mehr aus zwei gleichen Teilen zusammensetzt. Jedoch kann der Fehler in diesem Code noch nicht korrigiert werden: Erhält der Empfänger das Signal 0010, so kann es sich dabei um ein a handeln (drittes Bit umgeklappt) oder ein c (erstes Bit umgeklappt). Werden mehr als ein Bit fehlerhaft übertragen, so ist mit diesem Verfahren auch die Fehlererkennung nicht mehr gewährleistet, da dann statt a (0000) z.B. b (0101) empfangen werden könnte. Fehlererkennung ist hierbei nur dann möglich, wenn ein Zeichen wie z.B. 1100 empfangen wurde, das weder zum Zeichenvorrat der Codewörter noch zu dem der um 1 Bit verfälschten Codewörter gehört.

§ 1046 Das betrachtete Codierungsbeispiel ermöglicht also bei Verdopplung der Bits nur eine einfache Fehlererkennung, aber keine Korrektur. Fehlererkennung ließe sich für dieses Beispiel (also mit nur einem umklappenden Bit) auch einfacher einführen. Dazu wird an den ursprünglichen Code ein Paritätsbit angehängt. Dieses Paritätsbit ist so gewählt, dass jedes Zeichen eine gerade Anzahl von Einsen enthält. Die Codierungstabelle wird zu

Zeichen	Code	Codierung
a	00	000
b	01	011
c	10	101
d	11	110

Um einzusehen, dass bei dieser Codierung Fehler erkannt werden können, ist es nicht einmal notwendig, sich eine Tabelle aller möglicher Fehler anzulegen. Betrachtet man die Codierung, so zeigt sich, dass sich Zeichen stets durch zwei Bit voneinander unterscheiden (sonst könnte ja die Zahl der Einsen nicht immer gerade sein), d.h. wenn nur ein Bit falsch übertragen wird, ist das Zeichen immer illegal insofern, als dass dann plötzlich die Zahl der Bits ungerade wird. Damit gehört das Zeichen aber nicht mehr zum Zeichenvorrat der Quelle und ist damit auch als falsches Zeichen erkannt. Dieser Abstand zwischen zwei Codewörtern (im obigen Beispiel 2 Bit) wird als Hamming-Distanz d bezeichnet. Die Hamming-Distanz ist ein zur Bestimmung der Korrekturmöglichkeiten eines Codes wichtiger Begriff [87].

Verständnisfrage 42 Statt des Verdopplungscode in § 1045 wird ein Wiederholungscode eingeführt, in dem jedes bit dreimal transmittiert wird, d.h. $0 \rightarrow 000$ und $1 \rightarrow 111$. Lassen sich auf diese Weise Fehler erkennen und korrigieren? Hängt eine oder beide Möglichkeiten von der Wahrscheinlichkeit p ein Bit zu klappen ab? Und wenn ja, sind beide Wahrscheinlichkeiten identisch oder nicht, und wie groß sind sie jeweils?

§ 1047 Um diese Begriffe für Hamming-Distanz und Korrekturfähigkeit quantitativ etwas besser erfassen zu können, betrachten wir den in Abb. 6.20 dargestellten symmetrischen Binärkanal: der symmetrische Binärkanal verfälscht jeweils mit der gleichen Wahrscheinlichkeit p eine 0 in eine 1 oder eine 1 in eine 0, die Verfälschung wirkt so, dass aus einem Binärzeichen stets wieder ein Binärzeichen wird und kein Zeichen verloren geht oder dazu

kommt (die Länge des Codewortes bleibt also erhalten).⁹ Die Einzelfehlerwahrscheinlichkeit p ist damit ein Maß für die Störungsintensität des Kanals (beim Telefon ist p ungefähr 0.2 Promille, bei höherwertigen Verbindungen wie Datex-P oder Datex-L liegt die Fehlerwahrscheinlichkeit zwischen 1 und 10 pro Million übertragener Bits).

§ **1048** Über diesen binärsymmetrischen Kanal aus Abb. 6.20 werden nun Nachrichten als Binärzeichen der Länge n übertragen. Nur eine Auswahl aus allen möglichen Wörtern der Länge n wird vom Codierer erzeugt und dient somit der Informationsübertragung. Im obigen Beispiel der Codierung mit Paritätsbit werden die ersten 2 von 3 Bits zur Informationsübertragung benötigt, das dritte Bit wird in Abhängigkeit von den ersten beiden Bits gewählt. Es gibt noch jeweils vier weitere Worte, die aber nicht verwendet werden, da dann die gerade Anzahl der Einsen nicht gegeben ist, d.h. nur die Hälfte der mit drei Bit erzeugten Zeichen wird auch als Code verwendet). Von der geschickten Auswahl der Codewörter hängt die Qualität eines solchen Codes ab:

Definition 9 Die durch die Kanalcodierung eingebrachte Redundanz ist dann gut genutzt, wenn kein Paar von Codewörtern sich zu ähnlich ist, d.h. wenn die Hamming-Distanz möglichst groß wird.

§ **1049** Wenn wir die minimale Hamming-Distanz d in einem Code gefunden haben, so wissen wir auch, wie viele der Bits noch als falsch erkannt werden können. Mit f_e als der Zahl der erkennbaren Binärzeichenfehler gilt dann

$$f_e = d - 1$$

oder in Worten

Definition 10 Ein Blockcode mit der minimalen Hamming-Distanz d gestattet die Erkennung aller Fehler, solange weniger als d Stellen je Wort verfälscht werden.

6.4.5 Kanalcodierung: Fehlererkennung und -korrektur

§ **1050** Bisher haben wir uns auf die Fehlererkennung beschränkt, wir wollen jetzt versuchen die Möglichkeiten zur Fehlerkorrektur in Abhängigkeit von der Hamming-Distanz zu beschreiben. Betrachten wir dazu als Beispiel einen vierstelligen Code, aus dem aber nur zwei Wörter ausgewählt werden, nämlich 0011 und 1100. Die Codierung erfolgt über die Vorschrift

$$\begin{aligned} 0 &\rightarrow 0011 \\ 1 &\rightarrow 1100 \end{aligned}$$

§ **1051** Alle Worte, die sich gegenüber dem ersten Codewort um höchstens ein Bit verändert haben, fassen wir jetzt in einer Menge A zusammen. Die Menge B enthält alle Wörter, die sich vom zweiten Codewort nur um höchstens ein Bit unterscheiden. Die verbliebenen Wörter fassen wir in der Menge C zusammen. Diese drei Mengen sind gegeben durch

$$\begin{aligned} A &= \{0011, 0001, 0010, 0111, 1011\} \\ B &= \{1100, 0100, 1000, 1110, 1101\} \\ C &= \{0000, 0101, 0110, 1001, 1010, 1111\} \end{aligned}$$

§ **1052** Für die Decodierung eines Zeichens betrachtet man jetzt die Menge, in die das Zeichen gefallen ist. Alle Zeichen, die in A fallen, werden so interpretiert, dass das ursprünglich gesendete Zeichen 0011 war, alle Zeichen in B werden dem Zeichen 1100 zugeordnet. Zeichen, die in C einfallen, werden als falsch erkannt, können aber nicht korrigiert werden, sondern werden verworfen. Die Decodierungsvorschrift ist

$$\begin{aligned} A &\rightarrow 0 \\ B &\rightarrow 1 \\ C &\rightarrow \text{Fehler} \end{aligned}$$

⁹Formal ist die Annahme der Symmetrie einfach. Je nach Digitallogik (insbesondere Abstand Grenzen der Pegel) und Art der Störung ist die Symmetrie jedoch nicht zwingend gegeben.

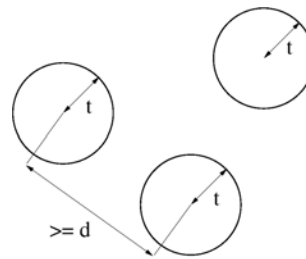


Abbildung 6.21: Ähnlichkeitsdekodierung

§ **1053** Dieses Codierungsverfahren erlaubt es also, alle einfachen Fehler zu erkennen und zu korrigieren. Zusätzlich kann ein Teil der Mehrfachfehler erkannt werden. Dieses Verfahren wird als Ähnlichkeitsdecodierung bezeichnet, da das empfangene Zeichen dem Codewort zugeordnet wird, dem es am ähnlichsten ist, von dem es sich also in der geringsten Zahl von Bits unterscheidet. Die Zahl t der korrigierbaren Stellen in einem solchen Verfahren ist gegeben durch

$$2t + 1 \leq d. \quad (6.12)$$

Der größte Wert von t , der mit dieser Bedingung verträglich ist, wird als die maximale Korrekturfähigkeit eines Codes bezeichnet.

Verständnisfrage 43 Wie sieht es eigentlich bei mit der Qualitätssicherung aus? Bei der Fehlerkorrektur kann im Prinzip ja auch eine falsche Korrektur erfolgen: es sind mehr als 1 Bit geklappt und damit die Ähnlichkeit zu einem falschen Codewort hergestellt. Diese Situation tritt bevorzugt bei großem p auf. Gibt es eine einfache Möglichkeit, auf falsche Fehlerkorrektur zu prüfen?

§ **1054** Den Beweis von (6.12) kann man sich mit Hilfe von Abb. 6.21 veranschaulichen (indirekter Beweis, [78]): Dazu nehmen wir an, dass bis zu t Stellen korrigierbar sein. Wenn die Ungleichung (6.12) verletzt ist, bedeutet das, dass es zwei Codewörter gibt, die sich in maximal $2t$ Stellen unterscheiden. Dann gibt es aber bei der Veränderung von t Stellen des einen Codewortes ein Wort, das sich auch von dem anderen Codewort nur um maximal t Stellen unterscheidet, d.h. es ist keine eindeutige Zuordnung des falschen Wortes mehr möglich, im Widerspruch zur vorausgesetzten Korrigierbarkeit des Codes.

§ **1055** In dem obigen Beispiel haben wir, um ein Zeichen sicher übertragen zu können, drei zusätzliche Zeichen verwendet, d.h. eine hohe Redundanz erzeugt. Generell besteht ein Wort der Länge n also aus einem Information tragenden Teil der Länge k und einer Zahl $mn - k$ von Prüfzeichen. Die relative Redundanz eines solchen Codes ist gleich

$$r = \frac{m}{n},$$

die Redundanz ist

$$R = m.$$

Für den oben betrachteten Code erhalten wir eine relative Redundanz von 75%, wobei trotz dieser großen Redundanz nur ein Bitfehler zuverlässig erkannt und korrigiert werden kann.

§ **1056** Für die Redundanz $R = m$ eines Korrektur fähigen Codes gilt in Abhängigkeit von der Korrekturfähigkeit t die Abschätzung

$$2^m \geq \sum_{j=0}^t \binom{n}{j}.$$

Anschaulich lässt sich die Gültigkeit dieser Hamming-Schranke so zeigen: Es gibt $\binom{n}{j}$ Wörter, die von einem bestimmten Codewort in genau j Stellen abweichen. Der Summenausdruck ist genau die Zahl der Wörter, die in höchstens t Stellen von einem bestimmten Codewort abweichen. Dann ist der Code aber nach Voraussetzung (6.12) decodierbar.

\vec{s}	\vec{t}	\vec{s}	\vec{t}	\vec{s}	\vec{t}	\vec{s}	\vec{t}
0000	0000000	0100	0100110	1000	1000101	1100	1100011
0001	0001011	0101	0101101	1001	1001110	1101	1101000
0010	0010111	0110	0110001	1010	1010010	1110	1110100
0011	0011100	0111	0111010	1011	1011001	1111	1111111

Tabelle 6.7: Hamming(7,4) Code; \vec{s} ist das Signal der Quelle, \vec{t} der zugehörige zu transmittierende Code

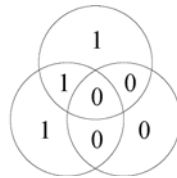
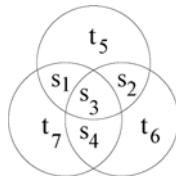


Abbildung 6.22: Graphische Darstellung für die Codierung eines Hamming(7,4) Codes

§ 1057 Für große Blocklängen n lässt sich die Redundanz [185] näherungsweise in der Form

$$r = \frac{m}{n} \geq b \left(\frac{t}{n} \right).$$

angeben, mit b als der Shannon-Funktion (6.2).

Verständnisfrage 44 Begründen Sie obigen Ausdruck.

6.4.6 Kanalcodierung: Hamming(7,4) Codierung

§ 1058 Die Hamming Codierung in § 1050 ist extrem ineffizient, da wir ein 1 Bit Codewort durch Hinzufügen von 3 Bits verlängert haben. Damit hat sich die Zahl der zu übertragenden Bits vervierfacht. Wir können das Prinzip jedoch auch auf längere Ausgangsblöcke anwenden. Ein realistischeres Beispiel ist der Hamming(7,4)-Code in Tabelle 6.7. Auch hier werden jedem Codewort der Quelle drei Bit hinzugefügt; da jedoch das Codewort der Quelle bereits aus 4 Bit besteht, ist das Gesamtsignal nicht einmal doppelt so lang. Dennoch unterscheidet sich jedes neue Codewort von jedem anderen um mindestens 3 Bit.

Codierung

§ 1059 Ein graphisches Verfahren zur in Tabelle 6.7 explizit gegebenen Codierung ist in Abb. 6.22 gegeben: die sieben zu transmittierenden bits werden so in drei sich schneidende Kreisen angeordnet, dass die von der Quelle gelieferten und in \vec{s} enthaltenen Bits in den Schnitten liegen. Diese Bits entsprechen den ersten vier zu transmittierenden Bits t_i mit $i = 1, \dots, 4$. Die verbliebenen Paritätsbits t_5 bis t_7 werden so gesetzt, dass die Parität innerhalb jedes Kreises gerade ist. Damit bestimmt t_5 die Parität der ersten drei Bits der Quelle, t_6 die der letzten drei und t_7 die der Quellbits eins, drei und vier.

§ 1060 Da der Hamming Code ein linearer Code ist, kann er mit Hilfe von Matrizen in wesentlich kompakterer (und leichter zu verwendender) Form geschrieben werden als in Tabelle 6.7. Das zu übertragende Codewort \vec{t} ergibt sich aus dem aus der Quelle entnommenen Codewort \vec{s} mit Hilfe der Generator-Matrix \mathbf{G} zu

$$\vec{t} = \mathbf{G}^T \vec{s}.$$

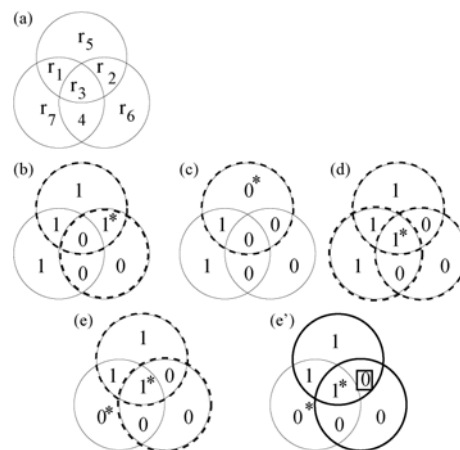


Abbildung 6.23: Graphische Decodierung (Syndrom-Decodierung) des Hamming(7,4) Codes; zur Erklärung siehe Text

Die Generator-Matrix für das Beispiel in Tabelle 6.7 ist

$$\mathbf{G}^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6.13)$$

wobei \vec{s} und \vec{t} als Spaltenvektoren angenommen wurden. Bei der Codierung ist Modulo-2 Arithmetik zu berücksichtigen: $1+1=0$, $0+1=1$ usw.

Verständnisfrage 45 Eine Summe von zwei Codewörtern in Tabelle 6.7 gibt wieder ein Codewort des Hamming(7,4)-Codes. Zufall oder gibt es eine Begründung?

Decodierung

§ 1061 Die Decodierung $\vec{t} \rightarrow \vec{s}$ ist weniger gradlinig. In einem perfekten Übertragungskanal ließe sich diese Decodierung durch Matrixinversion realisieren – aber in einem perfekten Übertragungskanal benötigen wir überhaupt keine Kanalkodierung. Das Problem der Decodierung liegt daran, dass (a) im Prinzip jedes, auch eines der Paritätsbits geklappt sein kann und (b) wir nicht einmal wissen, wie viele Bits in einem transmittierten Fragment \vec{t} geklappt sind.

Verständnisfrage 46 Macht die Matrixinversion trotzdem Sinn?

§ 1062 Wir betrachten jetzt einen symmetrischen Binärkanal, in dem alle Quellvektoren \vec{s} mit gleicher Wahrscheinlichkeit auftreten. Dann identifiziert der optimale Decoder alle Quellvektoren \vec{s} , deren Codierung $\vec{t}(\vec{s})$ vom empfangenen Code \vec{r} in der geringsten Zahl von Bits abweicht. Ein nicht sehr eleganter (aber ohne intellektuellen Aufwand begehbarer) Weg besteht darin, den Abstand von \vec{r} zu allen 16 \vec{t}_i in Tabelle 6.7 zu bestimmen und anschließend das Codewort mit dem kleinsten Abstand auszuwählen.

§ 1063 Eine graphische Form der Decodierung lässt sich in Anlehnung an die in Abb. 6.22 gezeigte Codierung entwickeln. Dazu tragen wir den empfangenen Code \vec{r} in die drei Kreise in wie in Abb. 6.23(a) gezeigt. Zur Erläuterung des Prinzips nehmen wir jetzt an, dass im transmittierten Codes $\vec{t} = 1000101$ das zweite Bit geklappt wurde, so dass $\vec{t}_E = 1100101$ empfangen wurde. Diese Sequenz tragen wir in die Kreise ein (Abb. 6.23(b)). In den gestrichelten Kreisen ist die Parität nicht erhalten. Da wir annehmen, dass möglichst wenige Bits gekippt sind, müssen wir jetzt ein Verfahren finden, wie wir die Parität wieder herstellen

können mit einer minimalen Zahl von zu klappenden Bits. Offenbar liefert Klappen des mit einem Stern gekennzeichnete Element r_2 das gewünschte Resultat.

§ 1064 Dieses Verfahren wird auch als Syndrom Decodierung bezeichnet. Dabei ist das Syndrom das Muster der Kreise, in denen die Parität verletzt wurde. Dieses Syndrom lässt sich auch als Vektor schreiben; im Fall von Abb. 6.23(b) ist das Syndrom $\vec{z} = (1, 1, 0)$, da in den ersten beiden Kreisen die Parität verletzt wurde, im dritten jedoch nicht. Die Aufgabe der Decodierung lässt sich mit Hilfe des Syndroms auch so beschreiben: gibt es in einer gegebenen Sequenz ein eindeutig zu identifizierendes Bit, dessen Kippen alle Elemente von \vec{z} identisch Null werden lässt? Das geklappte zweite Bit in Abb. 6.23(b) erfüllt diese Anforderung.

§ 1065 Abbildung 6.23(c) und (d) geben zwei weitere Beispiele für ein einzelnes geklapptes Bit. In Abb. 6.23(c) wurde das erste Paritätsbit t_5 gekippt. Damit ist nur in einem Kreis die Parität verletzt und die einzige Möglichkeit, durch Klappen eines einzigen Bits in allen drei Kreisen die Parität wieder herzustellen, ist das Klappen von r_5 . Damit ist der Fehler korrigiert. In Abb. 6.23(d) wurde das dritte Bit des Quellsignals und damit auch das dritte Bit des transmittierten Signal geklappt. Dadurch ist die Parität in allen drei Kreisen verletzt. Dürfen wir nur ein Bit klappen um die Parität in allen drei Kreisen wieder herzustellen, so muss r_3 geklappt werden. Auch hier ist die Korrektur geglückt.

§ 1066 Gehen wir alle möglichen einfachen Bitfehler durch, so lässt sich zu jedem der dabei entstehenden Syndrome eindeutig angeben, welches Bit (zurück) zu klappen ist:

Syndrom \vec{z}	000	001	010	011	100	101	110	111
klappe Bit	keins	r_7	r_6	r_4	r_5	r_1	r_2	r_3

In einem symmetrischen Binärkanal mit geringem Rauschen (kleinem p) klappt der optimale Decoder also maximal ein Bit.

§ 1067 Funktioniert dieses Verfahren auch bei zwei geklappten Bits? In Abb. 6.23(e) sind die beiden Bits r_3 und r_7 geklappt. Als Syndrom ergibt sich dabei das bereits aus Abb. 6.23(b) bekannte $\vec{z} = (1, 1, 0)$. Damit würden wir den gleichen Decodier-Algorithmus anwenden und r_2 klappen (Abb. 6.23(e')): damit hat unsere Korrektur aus zwei Fehlern drei gemacht. Da jede Variante von zwei Bitfehlern auf ein aus § 1066 bekanntes Syndrom führt, macht unser optimaler Decoder daraus ein Signal mit drei Bitfehlern. Damit geht nicht nur die Korrekturfähigkeit des Codes verloren sondern die Fehlerkorrektur sabotiert sogar die Fehlererkennung.

Verständnisfrage 47 Ist das ein großes Problem? Oder gibt es ein Eigenschaften des Übertragungskanals, die dies zu einem Pseudo- bzw. einem großen Problem machen?

§ 1068 Auch für die Decodierung können wir statt des graphischen Verfahrens eine Matrix-Schreibweise einführen. dazu zerlegen wir den empfangenen Code in die Quellbits $r_1 r_2 r_3 r_4$ und die Paritätsbits $r_5 r_6 r_7$. Zu den Quellbits lassen sich jeweils mit dem Algorithmus aus § 1060 die zugehörigen Paritätsbits bestimmen und mit den empfangenen vergleichen: die Differenz zwischen beiden gibt das Syndrom \vec{z} . Die zugehörige Korrektur ist bereits in § 1066 gegeben.

§ 1069 Das Verfahren lässt sich etwas kompakter darstellen, wenn wir die Generator-Matrix (6.13) in zwei Teile zerlegen:

$$\mathbf{G}^T = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_4 \\ \mathbf{P} \end{bmatrix}.$$

Darin ist \mathbf{I}_4 die 4×4 -Einheitsmatrix und \mathbf{P} eine 3×4 -Matrix. Mit Hilfe der daraus konstruierten Paritätsmatrix $\mathbf{H} = [-\mathbf{P} \ \mathbf{I}_3]$ lässt sich das Syndrom bestimmen als $\vec{z} = \mathbf{H}\vec{r}$. Explizit ist die Paritätsmatrix gegeben als

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Abbildung 6.24:
Fehlererkennung und
-korrektur bei der
Blockcodierung in
Matrixform

	Wort				Par.Bit
	0	0	0	0	0
	0	1	1	1	1
	0	0	1	0	1
	1	1	0	1	1
Par.Bit	1	0	0	0	

Für alle legalen Codeworte $\vec{t} = \mathbf{G}^T \vec{s}$ sind alle Elemente von $\mathbf{H} \vec{t}$ identisch Null. Ein realer empfangener Vektor \vec{r} unterscheidet sich vom transmittierten Vektor \vec{t} um einen Rauschvektor \vec{n} : $\vec{r} = \mathbf{G}^T \vec{s} + \vec{n}$. Syndrom-Decodierung bedeutet, den wahrscheinlichsten Rauschvektor \vec{n} zu finden, der die Bedingung $\mathbf{H} \vec{n} = \vec{z}$ erfüllt. Ein derartiger Algorithmus wird auch als Maximum-Likelihood Decoder bezeichnet – letztendlich ist es wieder eine Ähnlichkeitsdekodierung.

Verständnisfrage 48 Beim Hamming(7,4) Code werden den vier Bits der Quelle drei Paritätsbits zugefügt. Diese Kombination ist praktisch für die graphische Darstellung in Abb. 6.22 und 6.23; aber müssen es zwingend drei Paritätsbits sein? Und kann ein Code mit drei zusätzlichen Bits auch bei einem Code mit drei oder fünf Bits aus der Quelle zumindest für einen einzelnen Bitfehler eindeutige Decodierbarkeit liefern?

6.4.7 Kanalcodierung: Einfache Blockcodierung in Matrixform

§ 1070 Wir hatten in § 1046 die Einführung eines Paritätsbits zur Fehlererkennung kennen gelernt. Mit Hilfe von geeignet eingeführten Paritätsbits lässt sich in der Blockcodierung in Matrixform (Produktcode: Längs- und Querprüfung) außer der Fehlererkennung auch, zumindest in begrenztem Rahmen, eine Fehlerkorrektur vornehmen. Abbildung 6.24 zeigt dazu ein Beispiel: Der Nachrichtenstrom wird dabei zu Wörtern gleicher Länge (in diesem Falle 4 Bits) zusammengefasst, jedem dieser Wörter wird ein Paritätsbit angefügt. Ordnet man mehrere Wörter zu untereinanderstehenden Blöcken an, so lässt sich zu jeder der so entstehenden Spalten ebenfalls ein Paritätsbit erzeugen und angeben. Im Gegensatz zum einfachen Paritätsbit ist hierbei sogar eine Fehlerkorrektur möglich: Würde das eingekreiste Bit falsch übertragen, so würden sowohl in der zweiten Zeile als auch in der dritten Spalte die Paritätsbits nicht stimmen. Damit lässt sich nicht nur bestimmen, dass ein Fehler aufgetreten ist, sondern auch welches Bit das fehlerhafte ist. Also ist auch eine Korrektur möglich. Voraussetzung für die Korrektur ist jedoch, dass im ganzen Block nur 1 Bit falsch übertragen ist, bei mehreren falschen Bits kann zwar (muss aber nicht!) die Fehlererkennung noch funktionieren, die Korrektur ist jedoch keinesfalls mehr möglich.

6.4.8 Zusammenfassung

§ 1071 Die Codierung von Nachrichten lässt sich in zwei Bereiche unterteilen: Das Ziel der Quellencodierung ist eine möglichst vollständige Beseitigung der Redundanzen, d.h. die Nachricht soll in einen (Binär-Code) mit maximaler Effizienz umgewandelt werden. Der Quellencodierung schließt sich die Kanalcodierung an, die dem Code gezielt Redundanzen zugefügt, um eine Fehlererkennung und -korrektur zu ermöglichen. Dadurch wird aus jeder Nachricht ein Code erzeugt, der aus einem Nachrichten- und einem Prüfteil besteht. Die häufigste Form der Kanalcodierung ist die Verwendung von Paritätsbits.

6.5 Anhang: Technische Anmerkungen

§ 1072 Dieser Abschnitt enthält einen kurzen Überblick über einige technische Probleme, die bei der Kommunikation mit bzw. über Satelliten auftreten können. Diese Auswahl ist keinesfalls repräsentativ sondern hat das Ziel, einen kleinen Einblick zu geben.

6.5.1 Überblick

§ 1073 Die technischen Probleme bei der Kommunikation mit Raumfahrzeugen sind wesentlich größer als die Probleme bei der passiven Datenübertragung (Telefon, Fernsehen). Die wichtigsten Probleme sind:

- (A) sehr große Abstände des Senders von der Erde führen zu einem geringen Signal-Rausch-Verhältnis. Zur Illustration: interplanetare Raumsonden wie Voyager und Pioneer befinden sich in Abständen von einigen zehn AU (entsprechend etlichen Milliarden Kilometern) von der Erde. Dadurch ist die Signalleistung extrem gering, d.h. bordseitig muss viel Leistung pro Bit investiert werden. Kann die Leistung bei zunehmendem Abstand nicht erhöht werden, muss entsprechend die Bitrate verkleinert werden, d.h. es kann (bei vorhandenem Zwischenspeicher) u.U. sehr lange dauern, bis die volle Information eines Bildes zur Erde übertragen ist.
- (B) Das schlechte Signal-Rausch-Verhältnis ist aus Gewichts- und Leistungsgründen auch bestimmt durch die Begrenzung der bordseitigen Sendeleistung sowie der bordseitigen Antennengröße. Die sehr kleinen Antennen sind auf Satellitenseite auch für den Empfang von Steuerbefehlen ein Problem, allerdings kann hier durch eine Erhöhung der Sendeleistung auf der Erde gegen gesteuert werden.
- (C) Die Leistungsbegrenzung führt sowohl bord- als auch bodenseitig auf die Notwendigkeit von Richtantennen.
- (D) Die Begrenzung der Sendeleistung erzwingt eine optimale Nutzung der zur Verfügung stehenden begrenzten Übertragungsrates (Bitrate). Daher besteht die Notwendigkeit zur Datenkompression, d.h. Entfernung von Redundanz aus den Daten.
- (E) Das schlechte Signal-Rausch-Verhältnis ebenso wie die Störung des Übertragungskanal durch meteorologische oder ionosphärische Ereignisse bergen das Risiko von Übertragungsfehlern. Daher ist die Möglichkeit der Fehlererkennung und -beseitigung bei der Kommunikation mit Satelliten von Bedeutung.
- (F) Die Satelliten sind gegenüber der Erde als Ganzem ebenso wie gegenüber den Empfangsstationen auf der Erde in Bewegung. Dadurch kann es sich ergeben, dass sich nicht zu allen Zeiten eine terrestrische Empfangsstation im Blickfeld des Satelliten befindet. Dadurch ergibt sich die Notwendigkeit der Speicherung von Daten, früher in der Regel durch ein Magnetband.¹⁰
- (G) Beim Versenden von Telekommandos (d.h. Anweisungen an den Satelliten) ist insbesondere bei den planetaren Missionen die lange Laufzeit des Signals zu berücksichtigen. So erreicht der Befehl eine Raumsonde am Jupiter erst nach ca. 45 min, eine am Neptun dagegen erst nach 4 Stunden. Die Rückmeldung der Raumsonde ist entsprechend genauso lange unterwegs, d.h. alle Manöver müssen sehr sorgfältig im voraus geplant werden. Kommandos sind gerade in der Nähe der Planeten wichtig, z.B. zur Kurskorrektur für ein geplantes Swingby-Manöver oder zum genaueren Ausrichten der Kameras bei Planeten- oder Mondaufnahmen, aber auch zum Abschalten einzelner Instrumente, da sich in den Strahlungsgürteln der Planeten so große Teilchenflüsse ergeben können, dass es bei eingeschalteten Instrumenten zu einer Beschädigung von Sensoren oder anderen Instrumentbestandteilen kommen kann. Ist also ein Manöverbedarf erkannt, so dauert es erst einmal die einfache Signallaufzeit, bis der Satellit diesen Befehl erhält. Die Rückmeldung, ob dieser Befehl ausgeführt werden konnte oder nicht, kommt dann erst Stunden, nachdem der Befehl gegeben wurde. Andererseits haben z.B. die Voyager-Sonden Geschwindigkeiten, die im Bereich von Hunderttausend km/h liegen, d.h. falls der Befehl zu einer Kurskorrektur gegeben wurde, muss er schon im voraus sehr sorgfältig geplant werden, spontane Reaktionen auf kleine Fehler sind aufgrund der langen Signallaufzeiten nachher nicht mehr möglich (das ist ungefähr so, als würde man sich hier in

¹⁰Hierbei handelt es sich übrigens um ein interessantes technisches Problem, da das Einschalten eines Magnetbandes aufgrund der Drehimpulserhaltung auf eine Rotation des Satelliten in entgegengesetzter Richtung führt. Dieser Effekt ist aber aufgrund der genau ausgerichteten Instrumente und Antennen unerwünscht und daher zu vermeiden.

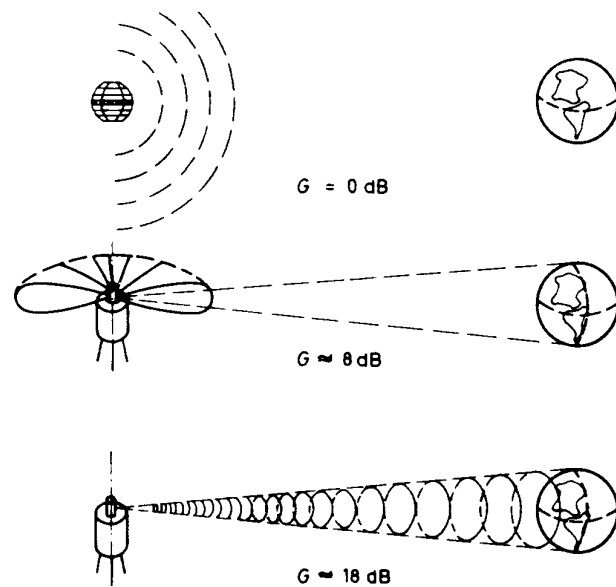


Abbildung 6.25: Antennengewinn bei Bündelung [95]

ein Auto setzen und schon beim Starten wissen müssen, wie man in München das Einparkmanöver genau durchzuführen hat). Klingholz [131] beschreibt diese Probleme recht anschaulich.

Diese Auflistung enthält die wichtigsten Probleme, wie sie bei der Kommunikation mit Satelliten bzw. insbesondere mit Raumsonden im interplanetaren Medium auftreten. Für einige der hier angesprochenen Probleme soll ein Lösungsansatz skizziert werden.

6.5.2 Lösungsansätze

Richtantennen

§ 1074 Wir hatten das geringe Signal-Rausch-Verhältnis ebenso wie die geringe Sendeleistung als Motivation für die Verwendung von Richtantennen angesprochen. Während die Verwendung von Richtantennen bei interplanetaren Missionen sofort einleuchtet, ist sie aber bereits bei den vergleichsweise geringen Abständen der geostationären Kommunikationssatelliten unerlässlich. Würden wir in diesem geringen Abstand einen Kugelstrahler als Sendantenne verwenden, so würde bereits der größte Teil der Leistung verlorengehen (oberer Teil in Abb. 6.25). Daher versucht man, die Antennenleistung in einen schmalen Kegel zu bündeln, der gerade den gesamten vom Satelliten sichtbaren Bereich der Erdoberfläche ausleuchtet (Mitte und Unten). Ist der Satellit jedoch spinstabilisiert, so wird aufgrund der Rotation des Satelliten immer noch ein großer Teil der Leistung sinnlos in den Raum abgestrahlt. Erst wenn man die Antenne entsprechend entgegengesetzt zum Satelliten rotieren lässt (entdrallte Antenne), wird immer nur ein schmaler Kegelausschnitt auf die Erdoberfläche gerichtet und somit bei fester Senderleistung die maximale Signalleistung beim Empfänger erreicht.

Leistungsbilanz

§ 1075 Der wichtigste Parameter zur Beschreibung des Verhältnisses zwischen eingesetzter und empfangener Leistung ist die Raumdämpfung (space loss). Die Energiebilanz bei der Kommunikation mit Raumsonden hängt dabei stark von der Bündelung der Antennen sowohl auf dem Raumfahrzeug als auch bei der Bodenstation ab. Die Bündelung kann durch den Antennengewinn G beschrieben werden. Dieser wird für eine bestimmte Richtung definiert als das Verhältnis aus dem tatsächlich in diese Richtung emittierten Energiefluss zu dem sich bei der isotropen Emission einer ungebündelten Antenne ergebenden Energiefluss. Der maximale Antennengewinn ergibt sich normalerweise entlang der Symmetrieachse der Antenne, so dass

der Antennengewinn in der Regel entlang dieser Richtung bestimmt wird. In einem Abstand d von der Antenne erzeugt eine emittierte Leistung P dann einen Energiefluss

$$\Phi = \frac{P \cdot G}{4\pi d^2} .$$

Ingenieure messen den Gewinn (ebenso wie Verluste) in einer logarithmischen Skala

$$g = 10 \cdot \log_{10} G$$

mit g in Dezibel (dB). Dabei entspricht 1dB einem Antennengewinn G von 1.25.

§ **1076** Um einen hohen Antennengewinn zu erreichen, werden Parabolspiegel benutzt mit einem Oszillator im Brennpunkt. Könnte man diesen Oszillator als eine Punktquelle mit verschwindend kleiner Wellenlänge bauen, so würde sich ein exakt paralleler Strahl ergeben mit einem unendlichen Antennengewinn. Unter realen Verhältnissen ergibt sich jedoch eine Aufweitung des Antennenstrahls, die einen Winkel einnimmt, der ungefähr durch das Verhältnis von Wellenlänge λ und Durchmesser der Antenne gegeben ist. Der Raumwinkel, in den die Strahlung emittiert wird, ist dann von der Größenordnung des Verhältnisses λ^2 zu Fläche A der Antenne. Der Antennengewinn (4π multipliziert mit dem Kehrwert des Raumwinkels) kann dann geschrieben werden als

$$G = \frac{4\pi A_{\text{eff}}}{\lambda^2} .$$

Für einen perfekten Parabolspiegel wäre die effektive Fläche A_{eff} gleich der Fläche A der Antenne. In der Praxis kann die effektive Fläche bis zu 0.8 oder $0.9A$ erreichen. Mit sehr großen Antennen (die Teleskope des Deep Space Network DSN haben Durchmesser bis zu 70 m) können im Mikrowellenbereich dann Antennengewinne von 60 bis 80 dB erreicht werden, entsprechend Winkeln von 0.001 bis 0.0001 rads. Diese hohen Antennengewinne erfordern umgekehrt aber eine extrem genaue Ausrichtung der Antennen!

§ **1077** Die effektive Fläche A_{eff} der Antenne ist gleichzeitig auch deren Querschnitt im Empfangsmodus. An Bord des Satelliten würde dann bei einem Telekommando eine Leistung

$$P' = \frac{PGA'_{\text{eff}}}{4\pi d^2} \tag{6.14}$$

empfangen werden, wobei das Hochkomma Größen bezeichnet, die mit dem Satelliten zu tun haben. Wenn wir mit G' den Gewinn des Empfängers beschreiben, so lässt sich (6.14) umschreiben zu

$$P' = \frac{PGG'\lambda^2}{(4\pi d)^2} = PGG'L .$$

Darin ist die Raumdämpfung $L = (\lambda/4\pi d)^2$ ein Maß für den Verlust, der sich alleine durch die geometrische Aufweitung des Antennenstrahls während seiner Ausbreitung ergibt.

§ **1078** Üblicherweise stellt man diese Energiebilanz logarithmisch dar:

$$p = 10 \cdot \log_{10}(P/1mW) .$$

Dann lässt sich die Leistungsverstärkung in dBm (dB bezogen auf mW) im Bezug auf eine nominelle Leistung von 1 mW angeben als

$$p' = p + g + g' + \ell .$$

Darin ist die logarithmische Raumdämpfung ℓ negativ. Zusätzliche Verluste durch atmosphärische Streuung und ohmsche Verluste in Sender und Empfänger sind in dieser einfachen Betrachtung nicht berücksichtigt.

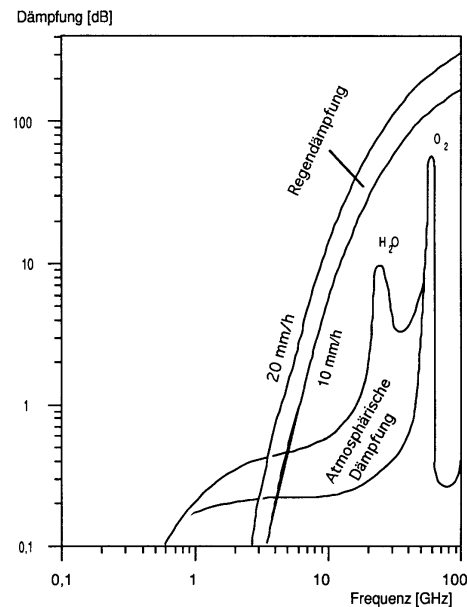


Abbildung 6.26: Atmosphärische Dämpfung und Regendämpfung in Abhängigkeit von der Frequenz (Dodel und Baumgart, 1986, in [190])

Seems it never rains in southern california

§ 1079 Auf seinem letzten Stückchen zwischen Raumsonde und Satellit hat das Funksignal noch die untere Atmosphäre (Troposphäre, Wetterschicht) zu durchqueren. Diese verändert das Signal durch

- atmosphärische Dämpfung: diese wird durch verschiedene Moleküle bewirkt, im wesentlichen jedoch Wasserdampf und Sauerstoff. Die atmosphärische Dämpfung hängt vom Wasserdampfgehalt der Atmosphäre ab und nimmt für unterschiedliche Frequenzen unterschiedliche Werte an (vgl. Abb. 6.26).
- Regendämpfung: Der Einfluss der Regendämpfung steigt mit zunehmender Frequenz an und steigt ebenfalls mit der Regenrate bzw. Tropfendichte. Die Regendämpfung steigt nahezu linear mit der Frequenz an (vgl. Abb. 6.26). Es ist dabei zwischen konvektivem Regen, der kräftig und lokal begrenzt ist, und Restregen mit niedriger Regenrate aber großer räumlicher Ausdehnung zu unterscheiden.
- Zusätzliches Rauschen durch Drehung der Polarisationssebene in Folge von Niederschlägen.

Extrem starke Regenfälle und insbesondere Gewitter können, allerdings in der Regel nur kurzzeitig und lokal begrenzt, zu einem vollständigen Ausfall von Satellitenverbindungen führen. Selbst wenn es nicht zum vollständigen Zusammenbruch der Verbindung kommt, können die Störungen aber so groß werden, dass die Fehlerrate Werte erreicht, bei denen eine Korrektur nicht mehr möglich ist.

6.5.3 Kommunikation über Satelliten

§ 1080 Alle bisher angesprochenen Problemem gelten natürlich auch für die Kommunikationssatelliten in erdnahen Bahnen. Um eine ungefähre Vorstellung über Kommunikationssatelliten zu vermitteln, zeigt Abb. 6.27 den Aufbau und die Ausleuchtungszonen von Intelsat V. Aus dem Aufbau des Satelliten kann man erkennen, dass die Kommunikation auf Wellenlängen im Bereich einiger GHz über verschiedene Antennen erfolgt. Eine dieser Antennen leuchtet praktisch die gesamte sichtbare Fläche der Erdkugel aus, die anderen Antennen dienen jeweils der Ausleuchtung der den Atlantik im Osten bzw. Westen begrenzenden Kontinente insgesamt, der kontinentalen Bereiche auf der Nordhalbkugel, sowie einer eher lokalen Verbindung zwischen Mitteleuropa und der mittleren Ostküste der USA.

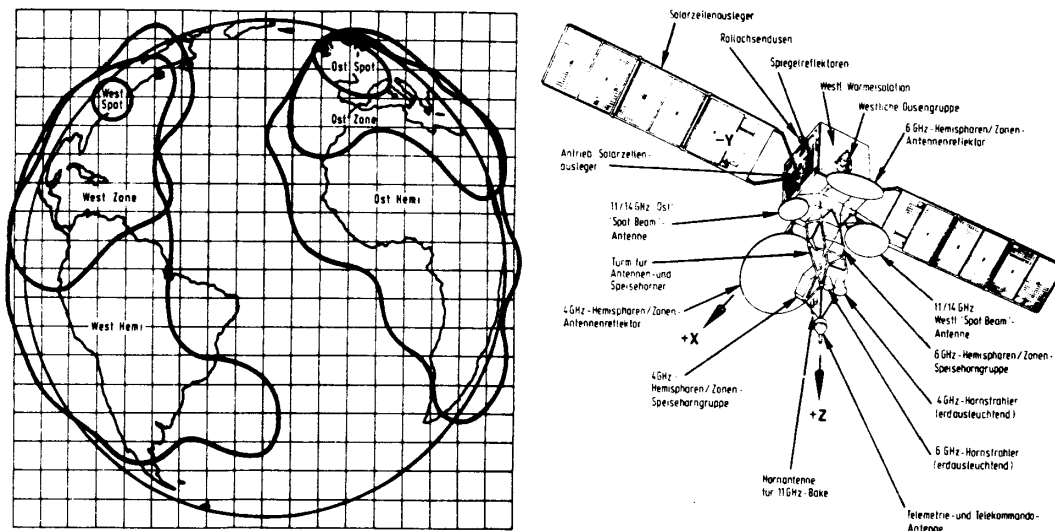


Abbildung 6.27: Ausleuchtungszonen von Intelsat V, über dem Atlantik stationiert (links) sowie Aufbau des Satelliten (rechts; [95])

Literatur

§ 1081 Eine ausgezeichnete und aktuelle Einführung in die Grundlagen der Kommunikationstechnik geben Proakis und Salehi [188]. Das Buch betrachtet zwar nicht speziell die Kommunikation zwischen Satellit und Bodenstation, da jedoch Kommunikation heute zu einem großen Teil über Satelliten erfolgt, sind die dort diskutierten Probleme und Verfahren für die Kommunikation mit Satelliten ebenso anwendbar.

§ 1082 Sehr gut ist die Darstellung der informationstheoretischen Grundbegriffe in Shannon und Weaver [224] oder Fano [55]. Die Darstellungen in v. Cube [247] und insbesondere Steinbuch [228, 229] sind zwar kürzer, enthalten aber neben den Grundlagen der Informationstheorie sehr gute und informative Betrachtungen zur Informationsverarbeitung durch den Menschen. Als moderne Alternative ist MacKay [158] zu empfehlen.

§ 1083 Als gute (und preisgünstige) Literatur zur Codierung ist zu empfehlen Grams [78]. In dem Buch werden auch weitere Codierungsverfahren und kompliziertere Annahmen über die Eigenschaften des Übertragungskanal diskutiert. Grundlagen der Datenkompression durch Redundanzreduktion werden auch in Wayner [249] und Witten et al. [255] diskutiert.

§ 1084 Technische Aspekte zur Kommunikation mit Satelliten und über Kommunikationssatelliten werden behandelt in Bertotti und Farinella [17], Hartl [90], Herter und Rupp [95], Quernheim [190] und Renner et al. [200]. Technische Aspekte der Signalübertragung allgemein werden diskutiert in Herter und Lörcher [96] und Lüke [157].

Fragen

Frage 58 Wie kann man einen Informationskanal formal beschreiben?

Frage 59 Geben Sie ein einfaches Modell für einen Informationskanal.

Frage 60 Was ist Information? Geben Sie Definitionen und Beispiele.

Frage 61 Wie misst man Information?

Frage 62 Wie bestimmt man den Informationsgehalt eines einzelnen Zeichens, wie den mittleren Informationsgehalt eines Zeichensatzes?

Frage 63 Erläutern Sie die Information, die in einem Versuch mit zwei möglichen Ausgängen stecken kann?

Frage 64 Was ist die Shannon'sche Funktion?

Frage 65 Was versteht man unter Redundanz? Wie kann man sie formal definieren.

Frage 66 Welche Bedeutung hat Redundanz in der normalen Kommunikation?

Frage 67 Welche Aufgabe hat die Quellenkodierung?

Frage 68 Nennen Sie Beispiele für Quellenkodierung.

Frage 69 Vergleichen Sie unter informationstheoretischen Gesichtspunkten die Codierung des Alphabets im ASCII- und im Morse-Code.

Frage 70 Was versteht man unter Kanalcodierung? Welche Ziele werden mit der Kanalcodierung verfolgt?

Frage 71 Erläutern Sie einfache Verfahren zur Fehlererkennung.

Frage 72 Welche Voraussetzungen muss ein Codierungsverfahren erfüllen, um nicht nur die Fehlererkennung sondern auch die Korrektur zu ermöglichen?

Frage 73 Was versteht man unter einem Präfix-freien Code?

Frage 74 Erläutern Sie den Lempel-Ziv-Algorithmus.

Aufgaben

Aufgabe 26 Zum Beispiel in Abb. 6.4. Bestimmen Sie den Informationsgehalt der einzelnen Farben sowie den mittleren Informationsgehalt (Entropie).

Aufgabe 27 Die beiden Binärzeichen mögen mit den Wahrscheinlichkeiten $1/6$ bzw. $5/6$ auftreten. Wie groß ist die Entropie H ? Beachten Sie, dass 1 Bit jetzt nicht mehr den Informationsgehalt 1 bit hat! Berechnen Sie die Anzahl N_{12} aller möglichen Folgen aus 12 Binärzeichen mit genau 2 Einsen. Die relativen Häufigkeiten der Zeichen entsprechen in dieser Folge genau den Wahrscheinlichkeiten der Zeichen. Berechnen Sie analog dazu N_{30} für Folgen aus 30 Zeichen mit genau 5 Einsen und N_{60} für Folgen der Länge 60 mit genau 10 Einsen. Wie verhalten sich die Werte $\text{ld}(N_k)/k$ zur Entropie H ?

Aufgabe 28 Zeichnen Sie den Codier-Baum für die nicht decodierbare Variante von Code 2 in Tabelle 6.3.

Aufgabe 29 Geben Sie einen entzifferbaren Code ohne Präfix-Eigenschaften an. Zeichnen Sie den Codier-Baum dazu.

Aufgabe 30 Die Zeichen a,b,c,d,e,f und g treten mit den Wahrscheinlichkeiten 0.3, 0.2, 0.2, 0.1, 0.1, 0.05 und 0.05 auf. Bilden Sie die Codes analog zu denen in Tabelle 8.2 und berechnen Sie die relative Redundanz.

Aufgabe 31 Codieren Sie den Satz 'Quellenkodierung ist Redundanzreduktion' mit (a) einer Huffman-Codierung, die das Auftreten der einzelnen Buchstaben in der deutschen Sprache berücksichtigt (vgl. Tabelle 6.1), (b) einem Lempel-Ziv-Algorithmus angewandt auf den in ASCII (8-bit) codierten Text.

Datenaufbereitung

Photo manipulation is as old as photography itself; the idea of a photo having inherent verisimilitude is a social construct. Photo manipulation has been regularly used to deceive or persuade viewers, or for improved story-telling and self-expression. As early as the American Civil War, photographs were published as engravings based on more than one negative.

Wikipedia, Photo Manipulation [742]

§ **1085** Datenaufbereitung von Satellitendaten ist lange Zeit im wesentlichen digitale, teilweise auch analoge Bildbearbeitung gewesen. Heutzutage sind viele Satelliteninstrumente zwar keine bildgebenden Instrumente mehr, die Bildbearbeitung nimmt jedoch auch hier einen großen Teil der Datenaufbereitung ein, da (a) die auch die Daten primär nicht bildgebender Verfahren bildhaft dargestellt werden, (b) die Darstellung in Bildern häufig Fehlererkennung und -korrektur erlauben, und (c) bei der automatischen Klassifikation nur der Übergang vom Pixel zum Voxel (Volumenelement) gemacht werden muss, ansonsten aber die gleichen Regeln gelten. Daher werde ich mich in diesem Abschnitt auf die Bildbearbeitung beschränken. Letztendlich lernen Sie dabei Beispiele für die Art von Algorithmen kennen, die jedes mehr oder weniger gute Bildverarbeitungsprogramm zur Verfügung stellt.

§ **1086** Die Bearbeitung von Satellitendaten am Boden erfolgt für ein einzelnen klassisches Imaging-Instrument (nur Nadir Blickrichtung) unter vier wesentlichen Kriterien:

1. Korrektur fehlender oder verrauschter Bildpunkte oder -zeilen, d.h. die Identifikation dieser Pixel und ihre anschließende Ersetzung durch einen sinnvollen Wert;
2. Verfahren zur Bildverbesserung wie Kantenanreicherung oder Kontrasterhöhung, d.h. Verfahren zur Verbesserung der Erkennung von Strukturen;
3. Verfahren zur automatischen Klassifikation von Bildmerkmalen, d.h. die automatische Erzeugung von Nutzer interessierenden Daten;
4. Verfahren zur effizienten und möglichst Verlust freien Speicherung der Daten, d.h. Datenkompression nach Regeln wie bereits bei der Quellencodierung in Abschn. 6.3 diskutiert.

Bei modernen Instrumenten kommen noch weitere Aspekte hinzu:

- da moderne Instrumente auch in Schrägsicht blicken können, muss jedes Bild erst einmal auf eine einheitliche Perspektive gebracht werden (Orthorektifikation, das Verfahren ist bereits von Luftbildern bekannt und wird z.B. in [104] beschrieben).

- da die Aufnahmen als kontinuierlicher Datenstrom erzeugt und transmittiert werden, müssen sie auf interessierende Formate zugeschnitten und an ein geographisches Koordinatensystem angepasst werden. Zumindest das letztere Problem ist ebenfalls bereits von Luftbildaufnahmen bekannt und wird z.B. bei [104] beschrieben.
- zur Verbesserung des Bodenaufklärungsvermögens werden bereits seit LandSat 3 Daten von verschiedenen Instrumenten kombiniert; in der Regel ein panchromatisches Instrument mit hoher Auflösung und ein multispektrales mit geringer Auflösung. Diese Kombination setzt die beiden vorher genannten Schritte voraus.
- zur Untersuchung von zeitlichen Veränderungen werden die Daten eines oder mehrerer Instrumente zu verschiedenen Zeiten untersucht. Diese cospatiale Analyse erfordert komplexe Algorithmen, [148, 149] erläutert dies an einem Beispiel.

§ 1087 Einen weiteren wichtigen Aspekt der Bildverarbeitung werden wir nicht betrachten: die geometrische Korrektur der Abbildungsfehler. So sind die vom Scanner gelieferten Streifen nicht exakt senkrecht zur Flugrichtung sondern auf Grund der Eigenbewegung des Satelliten leicht gegen die Senkrechte geneigt. Auch sind die Pixel zu den Ende der Scanbahn durch die schräge Blickrichtung gegenüber denen direkt auf der Bodenspur verzerrt.¹ Beide Effekte sind rein geometrisch, treten in jeder Szene auf und können durch Projektionen korrigiert werden, vgl. z.B. [41, 43, 111, 209].

Verständnisfrage 49 Sind die verschiedenen Bearbeitungsformen kommutativ oder nicht. Oder würden Sie inhaltlich erst

7.1 Korrekturverfahren

§ 1088 Korrekturverfahren zerfallen, wie bereits in Abschn. 6.4 diskutiert, in zwei Teile: die Fehlererkennung und die eigentliche Fehlerkorrektur. Einige Fehler sind einfach zu erkennen, insbesondere Pixel mit dem Wert 0 oder gar fehlende oder durch einen Füllwert ersetzte Zeilen. Andere Fehler, insbesondere verrauschte Pixel, dagegen sind nicht unbedingt so einfach zu erkennen.

§ 1089 Eine echte Korrektur der so identifizierten fehlerhaften Pixel ist allerdings in der Regel nicht möglich: im Zusammenhang mit der Kanalcodierung haben wir bereits festgestellt, dass eine Codierung, die eine Fehlerkorrektur erlaubt, das zu übertragende Datenvolumen deutlich erhöht. In der Bild gebenden Fernerkundung geht man daher einen anderen Weg: fehlerhafte Pixel werden durch den Mittelwert der sie umgebenden Pixel ersetzt, da man davon ausgeht, dass zwischen benachbarten Bildpunkten ein gewisser Zusammenhang besteht (Kontext bezogene Korrektur).

§ 1090 Die folgenden Korrekturverfahren finden keine Entsprechungen in modernen Bildverarbeitungsprogrammen. Allerdings lässt sich insbesondere am ersten Verfahren, der Korrektur fehlender Pixel, die Idee des Kernels gut einführen. Dieser ist die Grundlage für viele weiteren Manipulationsverfahren.

¹Systematische Verzerrungen entstehen durch das Aufnahmeverfahren, als Beispiel sei hier der LandSat TM betrachtet. Der Zeitunterschied zwischen der Aufnahme des ersten und letzten Bildelements einer Zeilenreihe beträgt 60 ms, der Unterschied zwischen der ersten und letzten Zeile einer Szene 25 s. Da sich der Satellit in diesen Zeiten bewegt (mit einer Geschwindigkeit von ungefähr 7 bis 8 km/s bzw. 480 m während einer Zeilenabtastung), wird kein exakt rechtwinkliges Raster der Erdoberfläche abgetastet, wie es uns in der Abbildung vorgespiegelt wird. Durch die Erdkrümmung und die panoramische Abtastung quer zur Flugrichtung erhält das Bild außerdem einen von der Bildmitte zum rechten und linken Rand hin kontinuierlich abnehmenden Maßstab. Diese Fehler sind, da sie systematisch sind, rechnerisch relativ einfach zu erfassen und zu korrigieren. Unsystematische Fehler können nur mit Hilfe von vorher festgelegten Referenzpunkten aus der Aufnahme herauskorrigiert werden.

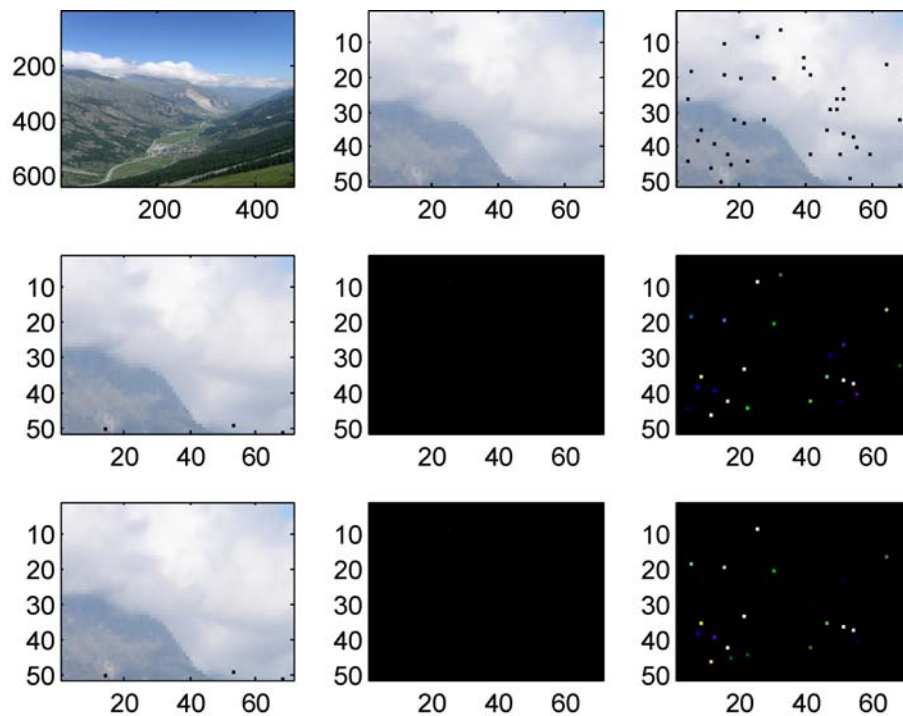


Abbildung 7.1: Korrektur fehlender Pixel: in der oberen Reihe links das vollständige Bild, in der Mitte ein Ausschnitt und rechts ein Bild, in dem einige Pixel nach Zufallsprinzip entfernt wurden. Die Zeilen darunter geben jeweils links ein korrigiertes Bild, in der Mitte die Abweichung zwischen korrigiertem Bild und Original und rechts die um einen Faktor 100 überhöht dargestellte Abweichung für einen 3×3 -Kernel in der mittleren Zeile und für einen 5×5 -Kernel in der unteren

7.1.1 Fehlende Pixel

§ 1091 Als erstes wollen wir den Fall betrachten, dass für einzelne Bildpunkte der Intensitätswert nicht oder als Null übertragen wurde. Befinden sich diese Pixel nicht gerade in einer sehr dunklen Szene, so sind sie auch visuell leicht zu identifizieren.

Verständnisfrage 50 Und in einer recht dunklen Szene? Ist es schlimm, wenn dort das Fehlen eines Pixels übersehen wird?

§ 1092 Fehlerhafte Pixel haben verschiedenen Ursachen. Meistens entstehen sie durch Übertragungsfehler und sind damit unabhängig von der Szene und vom Kanal. Fehlerhafte Pixel können auch durch CCD-Fehler entstehen: diese sind leicht zu erkennen, da sie in allen Kanälen an gleicher Stelle auftreten.

§ 1093 Abbildung 7.1 gibt ein Beispiel für in einem Bild fehlende Pixel (rechts oben). Die Fehlstellen wurden aus dem Original (Mitte oben) durch Nullsetzen zufällig ausgewählter Pixel erzeugt. Für die Korrektur derartiger einzelner Fehlstellen ersetzt man den fehlenden Wert durch den Mittelwert der umgebenden Pixel. Für die Bestimmung dieses Mittelwerts kann man einen 3×3 -Kernel verwenden oder einen 5×5 -Kernel, vgl. Abb. 7.2.

§ 1094 Bei einem 3×3 -Kernel werden alle direkt benachbarten Bildpunkte berücksichtigt, vgl. linken Teil von Abb. 7.2. Ist $p(i, j)$ der fehlerhafte Bildpunkt, so wird er ersetzt durch den Mittelwert

$$\bar{p}(i, j) = \frac{1}{8} \left(\sum_{j'=j-1}^{j+1} \sum_{i'=i-1}^{i+1} p(i', j') - p(i, j) \right).$$

Abbildung 7.2: Kernel verschiedener Größe zur Korrektur fehlerhafter Pixel

34	39	49
54	0	32
39	45	47

36	31	59	34	42
43	34	39	49	38
38	54	0	32	52
46	39	45	47	45
34	54	43	31	68

Im Beispiel in Abb. 7.2 erhalten wir damit $\bar{p} = 42.4$.

§ 1095 Mit diesem Verfahren können keine Pixel korrigiert werden, die sich am Rand einer Szene befinden, da diese nicht von der notwendigen Zahl anderer Pixel umgeben sind – allerdings kann man ein modifiziertes Korrekturverfahren verwenden, bei dem der 3×3 Kernel durch ein 2×3 - bis 3×2 -Kernel ersetzt wird. Der Nachteil dieses Ersatzverfahrens ist die geringe Anzahl von verwendeten Gitterpunkten: statistische Fehler werden nicht ausgemittelt und die Korrektur kann durch einen Ausreißer dominiert werden.

§ 1096 In der mittleren Zeile von Abb. 7.1 ist ein 3×3 -Kernel zur Korrektur der fehlerhaften Pixel verwendet. Das Bild links ist das korrigierte Bild, in der Mitte ist die Differenz zwischen korrigiertem Bild und Original gezeigt, rechts die um einen Faktor 100 überhöhte Differenz. Die Korrektur liefert bei rein visueller Inspektion bereits recht gute Ergebnisse (insbesondere lenken die fehlenden Pixel nicht mehr die Aufmerksamkeit auf sich), das Differenzbild zeigt nur marginale Abweichungen zum Original.

§ 1097 Eine Erweiterung des Verfahrens ist die Verwendung eines 5×5 -Kernels, vgl. rechtes Teilbild in Abb. 7.2. Auch hier wird der fehlende Pixel durch den Mittelwert der umgebenden Pixel ersetzt:

$$\bar{p}(i, j) = \frac{1}{24} \left(\sum_{j'=j-2}^{j+2} \sum_{i'=i-2}^{i+2} p(i', j') - p(i, j) \right).$$

In diesem Beispiel beträgt das Ergebnis $\bar{p} = 43.0$.

§ 1098 Die Anwendung auf die Daten ist in der unteren Zeile von Abb. 7.1 gezeigt. Rein optisch bringt das Verfahren gegenüber dem kleineren Kernel keine Verbesserung, lediglich im hundertfach überhöhten Differenzbild erkennt man, dass einige weitere Pixel keine Abweichung vom Original mehr zeigen.

§ 1099 Beide Kernel haben ihre Vor- und Nachteile: bei stark verrauschten Daten aus einer relativ homogenen Szene ist der größere Kernel geeigneter, da er auf Grund der Mittelung über die große Pixelzahl das Rauschen besser unterdrückt. Allerdings hat der große Kernel den Nachteil einer höheren Rechenzeit und den Verlust einer weiteren Pixelreihe am Rand, die nicht mehr korrigierbar ist. Außerdem ist ein großer Kernel in einer stark variablen Szene und insbesondere in der Nähe einer Grenze ungünstig, da Pixel von verschiedenen Objekten gemittelt werden.

§ 1100 Die Korrektur fehlender Pixel sollte daher mit Vorsicht vorgenommen werden. Um ein hübsches Bild ohne störende Sommersprossen zu zeigen, ist die Korrektur sicherlich sinnvoll. Soll das Bild aber als Grundlage für eine automatische Klassifikation verwendet werden, so ist es besser, den entsprechenden Pixel ganz wegzulassen.

7.1.2 Periodisch fehlende Streifen

§ 1101 Während fehlende Pixel meistens durch stochastische Einflüsse entstehen, sind periodisch fehlende Streifen in der Regel ein instrumentelles Problem. Für ihre Korrektur werden

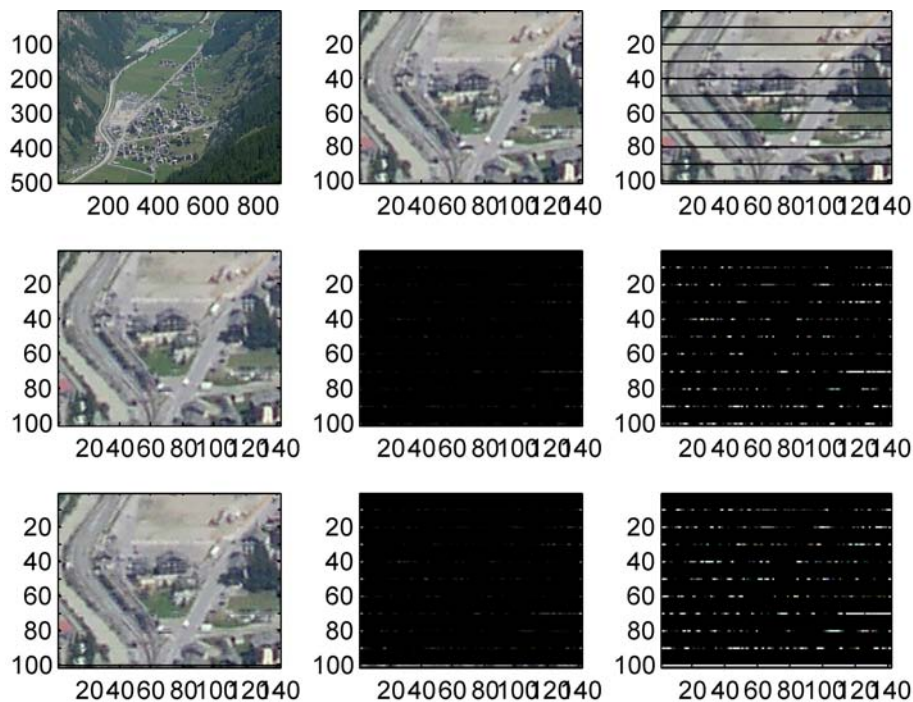


Abbildung 7.3: Fehlende Zeilen und deren Korrektur. Aufbau wie Abb. 7.1, das Differenzbild jedoch nur um einen Faktor 10 erhöht

ebenfalls die Kernel aus Abb. 7.2 verwendet, allerdings werden jetzt natürlich die Bildpunkte in der fehlenden Zeile nicht mehr berücksichtigt. Für den 3×3 -Kernel ergibt sich damit

$$\bar{p}(i, j) = \frac{1}{6} \left(\sum_{j'=j-1}^{j+1} p(i-1, j') + \sum_{j'=j-1}^{j+1} p(i+1, j') \right),$$

für den 5×5 -Kernel

$$\bar{p}(i, j) = \frac{1}{20} \left(\sum_{j'=j-2}^{j+2} \sum_{i'=i-2}^{i+2} p(i', j') - \sum_{j'=j-2}^{j+2} p(i, j') \right).$$

§ 1102 Abbildung 7.3 zeigt, in einer Struktur ähnlich Abb. 7.1, ein Beispiel für eine Szene mit periodisch fehlenden Streifen. Die Korrektur erfolgt mit dem 3×3 -Kernel (mittlere Zeile) und dem 5×5 -Kernel (untere Zeile). Die Differenz in der rechten Spalte ist jeweils um einen Faktor 10 überhöht.

§ 1103 Bei der visuellen Inspektion sind keine Relikte der Streifen zu erkennen (bei einer genauen Inspektion fällt natürlich auf, dass die Randpunkte einer Zeile nicht korrigierbar sind). Auch die Differenzbilder zeigen selbst in der zehnfachen Überhöhung (rechts) eine recht gut gelungene Korrektur – da die Linien nicht durchgängig sind, sind etliche Pixel vollständig korrigiert.

§ 1104 Die Verwendung des 5×5 -Kernels (untere Zeile von Abb. 7.3) liefert im überhöhten Differenzbild sogar noch etwas größere Abweichungen – da die Szene sehr stark wechselnde Pixelwerte hat, erweist sich die Mittelung über den großen Bereich als Nachteil. Außerdem ist der untere Streifen fehlender Pixel nicht korrigierbar, da er nur einen Streifen Abstand vom Rand hat und damit für einen 5×5 -Kernel nicht genug benachbarte Pixel vorhanden sind.

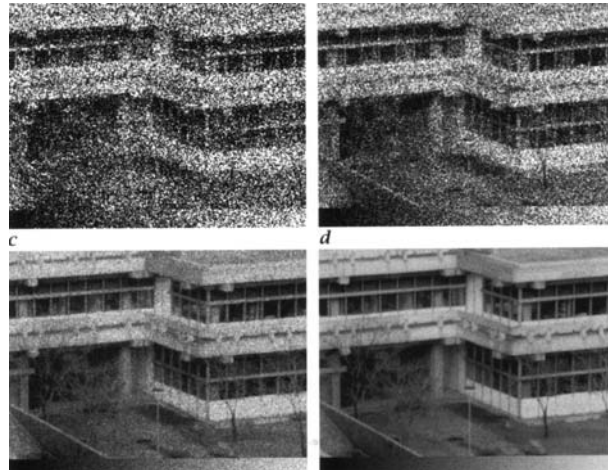


Abbildung 7.4: Simulation des Poisson-Rauschens [111]

§ 1105 Das Verfahren wurde hier für periodische Streifen demonstriert. Diese entstehen häufig durch nicht korrekt synchronisierte Abtastung. Einzelne fehlende Streifen können ebenfalls auftreten: erkennt man z.B. innerhalb einer Zeile eine mangelhafte Synchronisation der Spalten, so wird die Zeile durch Füllwerte ersetzt. Die Korrektur einzelner fehlender Zeilen folgt dem gleichen Verfahren wie die periodisch fehlender Zeilen.

7.1.3 Periodische Streifen

§ 1106 Periodische Streifen sind den periodisch fehlenden Zeilen äquivalent – der einzige Unterschied besteht darin, dass der Wert des Pixels nicht Null ist sondern in der ganzen Zeile eine Konstante ist. Dies macht einzelne fehlerhafte Zeilen vielleicht nicht unbedingt visuell aber zumindest für den Rechner leicht erkennbar – schon auf Grund des statistischen Rauschens kann selbst eine vollständig homogene Szene nie einen Streifen mit konstanten Pixelwerten liefern. Das Korrekturverfahren entspricht dem für fehlende Streifen.

7.1.4 Random Noise

§ 1107 Während fehlerhafte Streifen aus ihrer Anordnung einfach zu erkennen sind, sind fehlerhafte Pixel wesentlich schwieriger zu identifizieren. Ihre Behandlung ist eng verbunden mit der Behandlung des Rauschens der Bildpunkte.

§ 1108 Die Aufnahme eines Bildes, sei es mit einer konventionellen photographischen Emulsion oder mit einer CCD, basiert auf der Wechselwirkung der von der Szene emittierten oder reflektierten Photonen mit dem Detektor: je größer die Zahl der auftreffenden Photonen, um so größer die Intensität und damit der Helligkeitswert. Vom Messprinzip her basieren bildgebende Verfahren also auf der Zählung von Photonen in diskreten räumlichen Intervallen (Pixel) und diskreten Energiebändern (Spektralbereich, Kanal).

§ 1109 Daten, die zählend erhoben werden, gehorchen der Poisson-Statistik:

$$f(x) = \frac{\mu^x}{x!} e^{-\mu}$$

mit μ als dem Erwartungs- oder Mittelwert. Die Standardabweichung σ ist gleich der Wurzel aus dem Mittelwert

$$\sigma = \sqrt{\mu} .$$

Der relative Fehler ist damit $\sigma/\mu = 1/\sqrt{\mu}$, d.h. bei kleinen Zählraten ist der relative Fehler sehr groß, mit zunehmender Zählrate nimmt er ab. Für große Zählraten geht die Poisson-Verteilung über in die Gauß-Verteilung

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2 \right\}.$$

§ 1110 Abbildung 7.4 zeigt ein Beispiel für ein simuliertes Poisson-Rauschen. Die Einzelbilder entsprechen einer Maximalzahl von Photonen, die während der Belichtung auf ein Pixel fallen konnten von 3, 10, 100 bzw. 1000. Am unteren Bildrand ist jeweils ein linearer Graukeil angegeben. Im oberen linken Teilbild sind nur die Bereiche mit großem Kontrast unterscheidbar, Bereiche mit geringem Kontrast (linker unterer Bildteil) dagegen erscheinen homogen. Der schlechte radiometrische Kontrast reduziert damit auch das räumliche Auflösungsvermögen. Da benachbarte Pixel selbst bei homogener Szene auf Grund des Rauschens sehr unterschiedliche Werte annehmen können ($\sqrt{3}$ ist nahezu 2, d.h. der relative Fehler ist ca. 60%), erscheint das Bild sehr körnig. Im rechten unteren Teilbild dagegen ist der relative Fehler wesentlich geringer ($\sqrt{1000} \approx 32$), so dass bei homogener Szene benachbarte Pixel auf der Grauskala auch ähnliche Werte annehmen und damit bei einfacher visueller Inspektion nicht unterschieden werden.

§ 1111 Rauschen sorgt also für Variationen der Helligkeitswerte benachbarter Pixel selbst wenn diese eine homogene Szene betrachten. Umgekehrt können fehlerhafte Pixel leicht im Rauschen untergehen. Zu ihrer Identifikation kann man einen Filter auf der Basis der in Abb. 7.2 gezeigten Kernel verwenden: aus allen Punkten des Kernels wird der Mittelwert gebildet und mit dem Wert des zentralen Punktes verglichen. Liegt dieser mehr als ein vorgegebener Wert, z.B. das Dreifache der Standardabweichung, vom Mittelwert entfernt, so wird der Pixel als fehlerhaft identifiziert. Die Korrektur dieses Pixels erfolgt wie oben für fehlerhafte Pixel beschrieben unter Verwendung des gleichen Kernels.

7.1.5 Glätten und Schärfen

§ 1112 Ein Glättungsfilter zur Reduktion des Rauschens funktioniert ähnlich. Bei einem linearen Glättungsfilter wird der 3×3 -Kernel (bzw. bei Bedarf der 5×5 -Kernel) über die gesamte Szene geschoben und jeweils das zentrale Pixel durch den Mittelwert des Kernels ersetzt. Statt eines linearen Filters kann man auch einen Gauß-Filter verwenden, bei dem entsprechend der zwei-dimensionalen Normalverteilung

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp \left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2} \right)$$

gefiltert wird. Als Filtermatrizen ergeben sich für den 3×3 bzw. 5×5 -Kernel

$$G_2 = \frac{1}{16} \begin{vmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{vmatrix} \quad \text{bzw.} \quad G_4 = \frac{1}{256} \begin{vmatrix} 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 6 & 24 & 36 & 24 & 6 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \end{vmatrix}. \quad (7.1)$$

Im Gegensatz zum Mittelwertfilter wichtet der Gauß'sche Filter die einzelnen Pixel in Abhängigkeit von ihrem Abstand zum Mittelwert. Wir können an Stelle eines linearen Filters auch einen Gauß-Filter bei der Korrektur fehlender oder verrauschter Bildpunkte verwenden, der Kernel ist entsprechend dem in (7.1).

§ 1113 Ein Glättungsfilter hat die Funktion eines Tiefpass: schnelle Variationen (hohe zeitliche oder räumliche Frequenzen) werden gedämpft, langsame Variationen dagegen bleiben erhalten. Das Rauschen ist der hochfrequente Anteil des Bildes und damit zu dämpfen. Ein idealer Tiefpass überträgt bis zu einer Grenzfrequenz vollständig, bei höheren Frequenzen

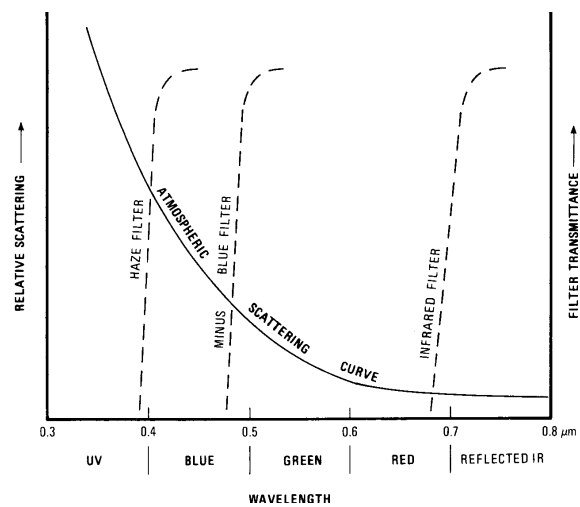


Abbildung 7.5: Atmosphärische Streuung und Bereiche, in denen Filter arbeiten [209]

sperrt er vollständig. Sie Übertragungsfunktion $H(u, v)$ mit u und v als den Koordinaten in der Frequenzdomäne ist

$$H(u, v)_{\text{TP,ideal}} = \begin{cases} 1 & \text{falls } D(u, v) \leq D_0 \\ 0 & \text{falls } D(u, v) > D_0 \end{cases}$$

mit $D(u, v) = \sqrt{u^2 + v^2}$ als dem Abstand des Punktes (u, v) in der Frequenzdomäne vom Nullpunkt und D_0 als der Grenzfrequenz. Diese rechteckige Übertragungsfunktion lässt sich mit dem linearen Kernel beschreiben; Beispiele für die Glättung finden sich auch in Abb. 9.5.

§ 1114 Ein realer Tiefpass im analogen Aufbau (z.B. Widerstand und Kondensator) hat keine rechteckige Übertragungsfunktion sondern eine sich kontinuierlich, aber monoton entwickelnde. Hier nimmt die Amplitude eines Signals an der Grenzfrequenz auf $1/\sqrt{2}$ des ursprünglichen Signals ab. Die Filterung mit einem Gauß-Filter wie in (7.1) ist ein Beispiel für eine realere Übertragungsfunktion, der Butterworth-Filter.

§ 1115 Der Tiefpass mittelt, d.h. er ‘vernichtet’ Informationen über Details um die Grundstruktur deutlicher zu machen. Aus der Elektronik ist der Hochpass als sein Gegenstück bekannt. Für den idealen Hochpass ergibt sich als Übertragungsfunktion

$$H(u, v)_{\text{HP,ideal}} = \begin{cases} 0 & \text{falls } D(u, v) \leq D_0 \\ 1 & \text{falls } D(u, v) > D_0 \end{cases}$$

Der Hochpass liefert den Teil des Signals, der vom Tiefpass zurück gewiesen wurde – das Rauschen bzw. die Veränderung. Einige typische Kernel für Hochpass-Filter in der Bildbearbeitung [180] sind

$$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 5 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -2 & 5 & -2 \\ 1 & -2 & 1 \end{bmatrix}, \quad \frac{1}{7} \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ -2 & 19 & -2 \\ -1 & 2 & -1 \end{bmatrix} \quad \text{oder}$$

$$\frac{1}{3} \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 & 1 & 0 \\ 1 & -2 & 4 & -2 & 1 \\ 1 & 4 & -13 & 4 & 1 \\ 1 & -2 & 4 & -2 & 1 \\ 0 & 1 & -1 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

7.1.6 Dunstkorrektur

§ 1116 Bei Multispektralaufnahmen bieten sich noch weitere Verfahren zur Verbesserung der Bildqualität an, da jeder der betrachteten Frequenzbereiche seine eigenen Vorzüge und

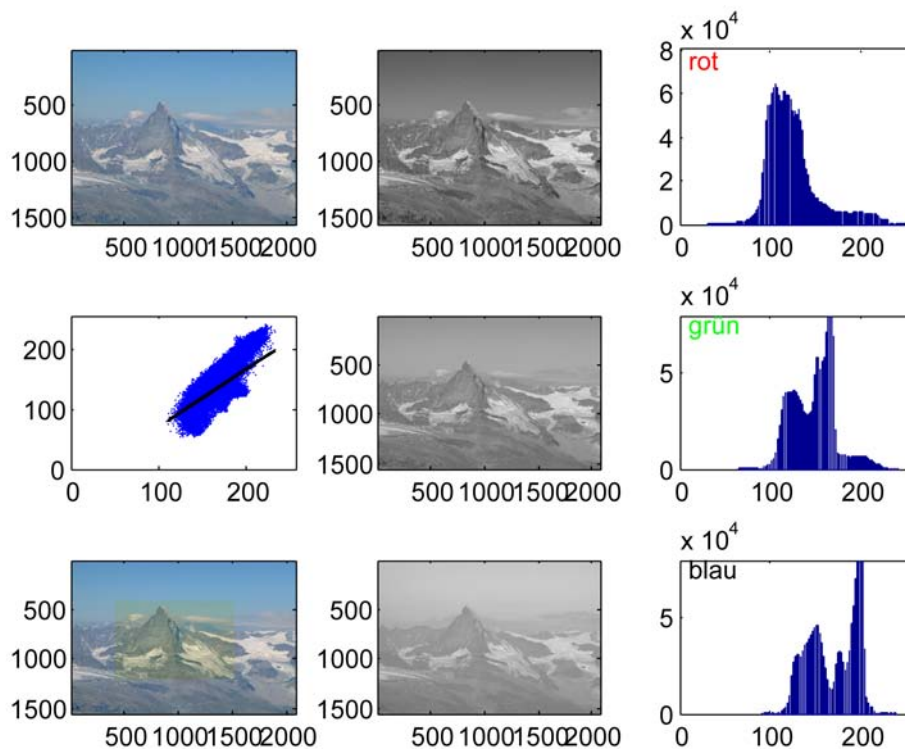


Abbildung 7.6: Dunststreuung

Schwächen hat (in Abhängigkeit vom verwendeten Filmmaterial, aber auch bedingt durch die atmosphärische Streuung). Durch geschickte Kombination der einzelnen Frequenzbereiche lassen sich ebenfalls Bildverbesserungen erzielen [209].

§ 1117 Abbildung 7.5 zeigt die Frequenzabhängigkeit der atmosphärischen Streuung und die Transmissionskurven verschiedener Filter. Die Streuung ist am stärksten im Ultravioletten bzw. blauen Bereich. Sie nimmt mit zunehmender Wellenlänge ab. Bei Luftbildaufnahmen wird die atmosphärische Streuung durch Verwendung eines Dunstfilters verringert, bei Falschfarbenfilmen wird die blaue Schicht auf Grund der starken Beeinflussung durch die Dunststreuung zu Gunsten der IR-empfindlichen Schicht weggelassen.

§ 1118 Einen Eindruck von der Dunststreuung in verschiedenen Kanälen des LandSat TM liefert Abb. 3.47. Dunststreuung stört jedoch nicht nur in Satellitenaufnahmen, wir können den Effekt bereits bei einer normalen terrestrischen Aufnahme über eine größere Distanz sehen. Dazu zeigt Abb. 7.6 im oberen linken Teil eine Aufnahme des Matterhorn vom Strahlhorn aus.² In der mittleren Spalte sind die einzelnen Schichten dieser Aufnahme gezeigt, von oben nach unten Rot, Grün und Blau. Die Dunststreuung ist im blauen Kanal gegenüber dem roten deutlich zu erkennen, auch im grünen Kanal zeigt sich noch Dunststreuung. In der rechten Spalte sind die Histogramme der Helligkeitswerte in den einzelnen Kanälen aufgetragen: der Peak bei großen Helligkeitswerten im blauen (und auch, wenn auch in etwas abgeschwächter Form) grünen Kanal entsteht durch die Dunststreuung. Die beiden unteren Aufnahmen in der linken Spalte geben eine Dunstkorrektur für einen Teil der Abbildung, das Verfahren wird im folgenden beschrieben.

²Die horizontale Entfernung beträgt ca. 18 km bei einer Höhe von 4 000 m, entsprechend einer mittleren Dichte der Atmosphäre von 55% der Dichte am Boden, d.h. 0.71 kg/m^3 . Damit ergibt sich eine Luftsäule zwischen Beobachter und Matterhorn-Ostwand von 12.7 t/m^2 . Der Druck der Atmosphäre am Boden entspricht dem einer 10 m Wassersäule, d.h. wir erhalten 10 t/m^2 , d.h. die beiden Luftsäulen und damit die mit ihnen verbundene Dunststreuung sind vergleichbar.

Abbildung 7.7: Dunstkorrektur durch Vergleich der Helligkeitswerte verschiedener Kanäle, hier am Beispiel des MSS auf LandSat

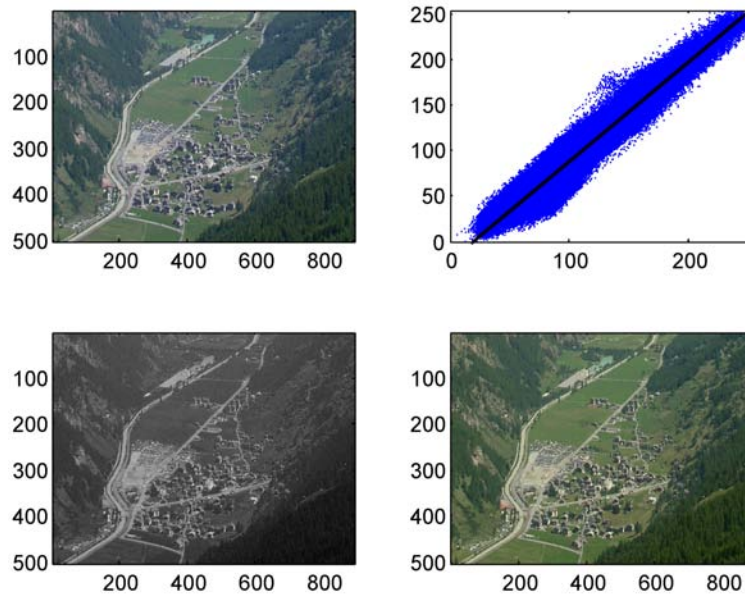
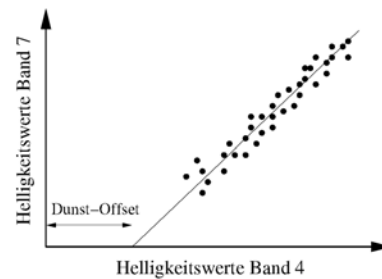


Abbildung 7.8: Dunst-Korrektur an einem Ausschnitt aus Abb. 7.1

§ 1119 Bei einem Multispektralscanner dagegen wird trotz der starken Beeinträchtigung durch Dunst auch ein blauer Kanal verwendet (z.B. LandSat MSS, vgl. Abb. 3.44). Bei LandSat wird der Kanal 7 (nahes IR, $0.8\text{--}1.1\ \mu\text{m}$) zur Korrektur von Kanal 4 (blau, $0.5\text{--}0.6\ \mu\text{m}$) verwendet. Atmosphärische Streuung reduziert den Kontrast, d.h. das Histogramm des entsprechenden Kanals wird gestaucht, insbesondere fehlen die Pixel mit sehr geringem Helligkeitswert: selbst bei der Aufnahme einer schwarzen Fläche werden durch die Atmosphäre immer Photonen in den Kanal gestreut. Dieses Fehlen der niedrigen Helligkeitswerte macht man sich bei der Korrektur zu Nutze.

§ 1120 Trägt man die Helligkeitswerte von Band 7 (IR) gegen die von Band 4 (Blau) auf, so findet sich grob ein linearer Zusammenhang, allerdings um einen Offset gegen den Ursprung verschoben. Dieser Offset entspricht den auf Grund der Dunststreuung in der Verteilung der Helligkeitswerte fehlenden Werten in Band 4. Dieser Offset wird anschließend von den Helligkeitswerten von Band 4 abgezogen, so dass ein korrigierter Kanal entsteht. Zur Kontrolle wird das Verfahren auch in Kombination von Kanal 4 mit Kanal 5 bzw. Kanal 6 vorgenommen, da die Fitgerade in Abb. 7.7 nicht nur durch Dunst sondern auch durch das unterschiedliche spektrale Reflektionsvermögen der verschiedenen Bildelemente entsteht. Das Verfahren funktioniert nur dann zuverlässig, wenn die Szene hinreichend dunkle Bereiche enthält.

§ 1121 Ein etwas mickriger Versuch einer Dunstkorrektur ist in Abb. 7.8 für einen Ausschnitt aus Abb. 7.1 gegeben. Links oben die vollständige Szene. Im rechten oberen Teilbild ist die Intensität des roten gegen die des blauen Kanals aufgetragen. Der Dunst bedingte Offset ist deutlich zu erkennen, er beträgt für diese Szene 20 Helligkeitswerte. Der korrigierte blaue Kanal (links unten) und das korrigierte Bild (rechts unten) zeigen natürlich nicht

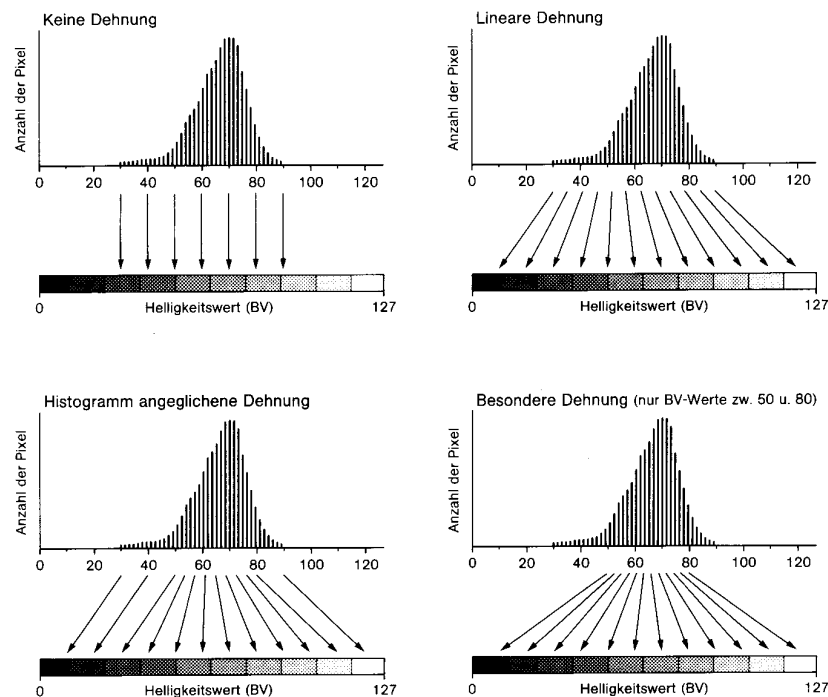


Abbildung 7.9: Dehnungsverfahren zur Kontrastanreicherung [154]

mehr Kontrast, da die Verteilung der Helligkeitswerte nicht gedehnt sondern nur verschoben wird. Allerdings sind die absoluten Helligkeitswerte im Gesamtbild besser getroffen, so erscheint die Vegetation grün und nicht mehr bläulich. Damit ist sie für ein automatisches Klassifikationsverfahren auch besser zu erkennen als im nicht korrigierten Bild.

§ 1122 Die Korrektur in diesem Beispiel ist sicherlich schlechter als in vielen Satellitendatensätzen, da (a) die betrachteten Kanäle relativ dicht beieinander liegen (es wird der rote Kanal zur Korrektur verwendet, nicht ein Kanal im nahen IR) und (b) im roten Kanal nur relativ wenige wirklich dunklen Pixel, d.h. Helligkeitswerte von Null, auftreten. Damit ist die Bestimmung des Offsets relativ ungenau.

7.2 Bildverbesserung

§ 1123 Verfahren zur Bildverbesserung lassen sich grob einteilen in

1. Kontrastanreicherung: bei eng benachbarten Bildwerten (z.B. Gletscher) lassen sich Unterschiede optisch kaum erkennen. Kontrastanreicherung dient dazu, diese Unterschiede hervor zu heben und damit Strukturen erkennbar zu machen.
2. Kantenanreicherung: der Kontrast an einer Grenze zwischen zwei unterschiedlichen Bildbereichen wird hervor gehoben um diese Grenze deutlicher heraus treten zu lassen. Das Verfahren ist insbesondere zur Identifikation von durch den Menschen errichteten Strukturen hilfreich. Kantenanreicherung ist ein Spezialfall der durch einen Hochpass bewirkten Anreicherung bzw. Hervorhebung von Änderungen.
3. Erkennung linearer Strukturen.

7.2.1 Kontrastanreicherung

§ 1124 Die Originalaufnahmen der Satelliten sind häufig schwer zu interpretieren, das Hauptproblem ist der geringe Kontrast. Ein wichtiges Verfahren zur Verbesserung der Bildqualität

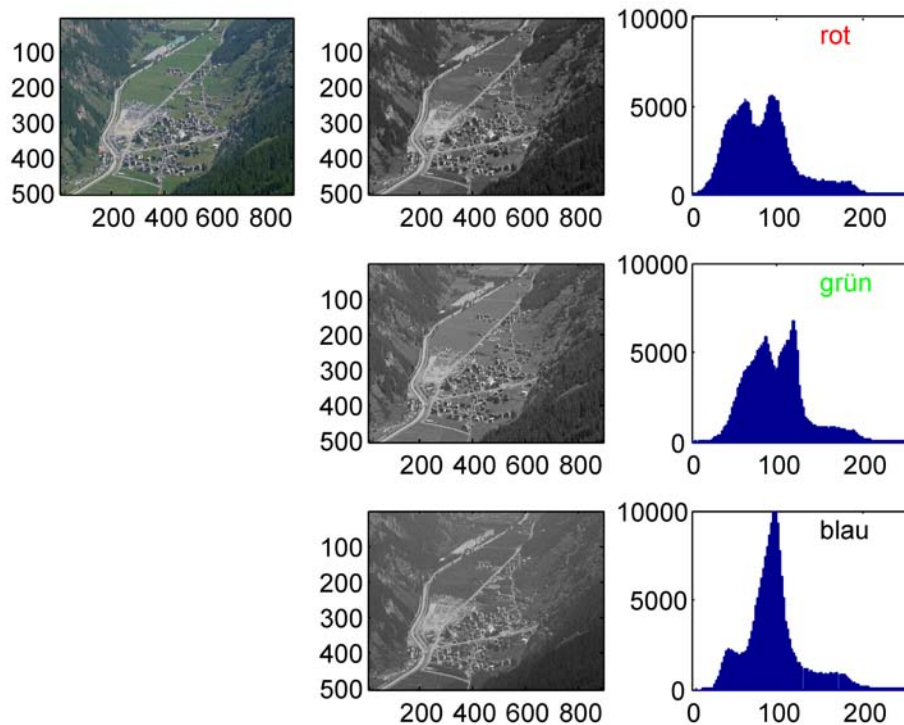


Abbildung 7.10: Die Szene oben links ist aus drei Teilbildern (rot, grün, blau, Mitte) zusammengesetzt, die Histogramme für die Pixelwerte sind jeweils in der rechten Zeile gegeben

ist die Kontrastanreicherung. Kontrastanreicherung kann z.B. dadurch erfolgen, dass man den Teil der Grauskala, in dem der größte oder interessanteste Teil des Bildes liegt, heraus nimmt und auf die gesamte Grauskala abbildet, d.h. unmittelbar benachbarte Grauwerte werden etwas auseinander gezogen, so dass sie für das Auge leichter zu unterscheiden sind. Für diese Abbildung gibt es verschiedene Verfahren, die in Abb. 7.9 zusammengefasst sind. Im oberen Teil der Abbildung sind jeweils Histogramme angegeben, die das Auftreten der verschiedenen Grauwerte in einem Bild beschreiben. Von der gesamten Skala treten nur Grauwerte im Bereich von 30 bis 90 auf, d.h. wir können diesen Bereich der Grauskala auf die komplette Skala abbilden. Die lineare Abbildung ist dabei der einfachste Fall. Sie berücksichtigt jedoch nicht, dass die Grauwerte nicht gleich verteilt sind, sondern dass der größte Teil der Grauwerte in diesem Beispiel im Bereich zwischen 54 und 76 liegt. Daher kann man auch versuchen, diesen Bereich besonders stark zu dehnen (Histogramm angegliche Dehnung) oder nur diesen Bereich zu dehnen und die anderen (wenigen) Werte zu vernachlässigen (besondere Dehnung).

§ 1125 Der Algorithmus für die lineare Dehnung ist

$$p' = (p - lb) \cdot \frac{ub - lb}{w}$$

mit lb und ub als der unteren bzw. oberen Grenze des ausgewählten Bereichs und w als der Bandbreite des ursprünglichen Bereichs. Negative Werte von p' werden auf Null gesetzt, Werte größer W auf w .

§ 1126 Um ein Gefühl für die Histogramme der Helligkeitswerte zu erhalten, betrachten wir nochmals die Szene aus Abb. 7.3. Abbildung 7.10 zeigt links oben die Szene, in der Mitte die drei Spektralbänder, aus denen die Szene zusammen gesetzt ist, und rechts die Histogramme für die einzelnen Kanäle. Helligkeitswerte liegen im Bereich zwischen 0 und 255, in allen drei Kanälen wird praktisch nur die untere Hälfte der Helligkeitswerte ausgenutzt, im oberen

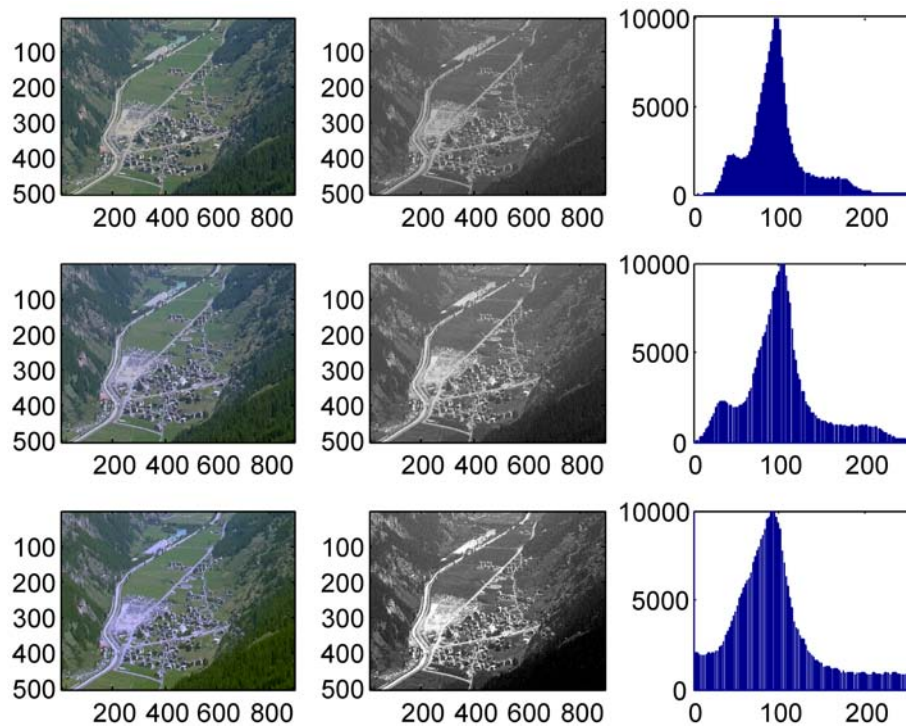


Abbildung 7.11: Für den blauen Kanal der Szene aus Abb. 7.10 wurde eine lineare Kontrastanreicherung vorgenommen: obere Zeile Originaldaten, mittlere Zeile Dehnung auf den Bereich von 20 bis 210, untere von 50 bis 180. In der linken Spalte wurde das gedehnte Bild im Blauen mit den ungedehnten Bildern in Rot und Grün überlagert

Bereich liegen nur noch wenige Werte. Während die Verteilungen im roten und grünen Bereich eine ähnliche Struktur mit einem Doppelpeak haben, ist die Verteilung im blauen Bereich um einen dominanten Einzelpeak konzentriert.

§ 1127 Da die Verarbeitung der Bilder kanalweise erfolgt, kann für jeden Kanal eine eigene Kontrastdehnung vorgenommen werden. Die Kanäle können dann anschließend zur Szene kombiniert werden.

§ 1128 In Abb. 7.11 wird nur die Dehnung des blauen Kanals aus Abb. 7.10 betrachtet. In der oberen Zeile sind die Originaldaten gegeben, in der zweiten Zeile wurden die Helligkeitswerte im blauen Kanal linear auf den Bereich zwischen 20 und 210 abgebildet, d.h. es wurde nur der Bereich weg geschnitten, in dem sich ohnehin kaum Helligkeitswerte befinden. Das sich ergebende Histogramm ist im rechten Teil gezeigt, das sich ergebende Bild des blauen Kanals in der Mitte. Die Erhöhung des Kontrastes und damit die Erkennbarkeit von Strukturen wird deutlich. Bei Kombination mit den beiden (unbehandelten) Kanälen ergibt sich die links gezeigt Szene. Eine weitere lineare Streckung des Histogramms auf den Bereich zwischen 50 und 180 (der Originaldaten) ist in der unteren Zeile gezeigt.

§ 1129 Für eine allgemeine Bildverbesserung ist bereits die relativ moderate Kontrastanreicherung in der mittleren Zeile ausreichend, bei der nur die extremen Pixel unterdrückt wurden. Für spezielle Fragestellung (z.B. Identifikation bestimmter Objekte, Rauschunterdrückung) kann eine weitere Kontrastanreicherung auch auf relativ enge Bereiche der Verteilung sinnvoll sein.

§ 1130 Eine andere Situation entsteht in einer Szene mit starkem Kontrast, z.B. bei der Aufnahme eines Gletschers und des umgebenden Felsens. Abbildung 7.12 zeigt ein Beispiel,

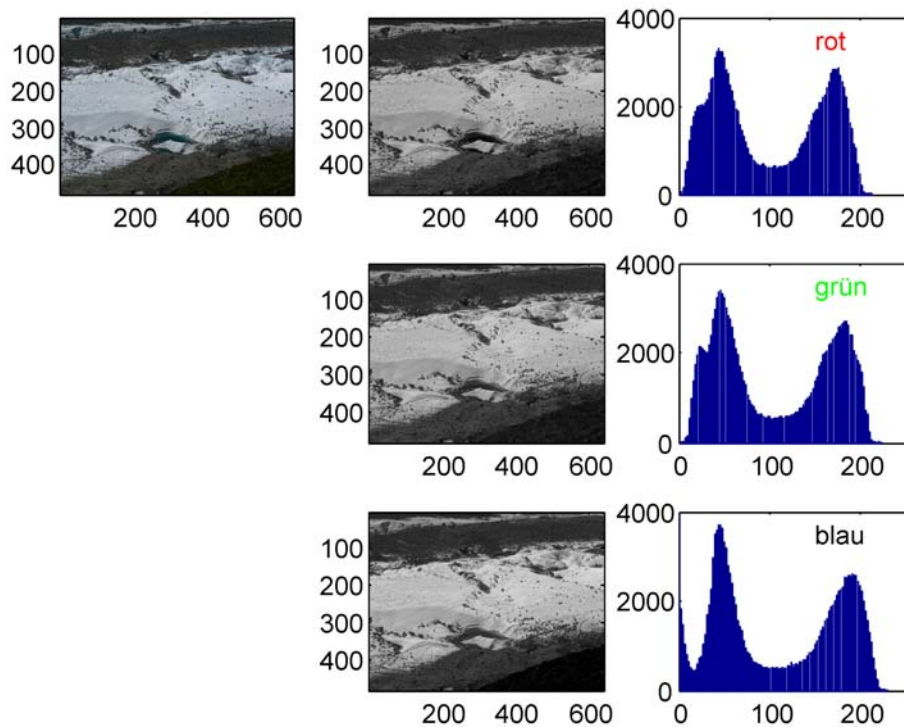


Abbildung 7.12: Teilbilder und Histogramme für eine Szene mit Gletscher und Fels, d.h. starkem Kontrast

wieder die Gesamtszene links oben, die einzelnen Teilbilder in der mittleren Spalte und die dazu gehörigen Histogramme rechts. In allen drei Teilbildern sind die Histogramme ähnlich: eine bimodale Verteilung mit einem Maximum bei niedrigen Intensitätswerten (Fels) und einem zweiten Maximum bei hohen Werten (Eis).

§ 1131 Eine Kontrastanreicherung ähnlich der in Abb. 7.11, bei der nur die nicht auftretenden Helligkeitswerte abgeschnitten werden, verändert zwar das Bild, liefert aber keine zusätzliche Information: die Unterscheidung zwischen Eis und Gletscher ist auf Grund der bimodalen Verteilungen auch im unbearbeiteten Bild bereits eindeutig. Die Erkennung von Details im Fels und/oder auf dem Gletscher dagegen verbessert sich kaum, da die beiden Peaks auf Grund ihrer geringen Breite kaum gestreckt werden.

§ 1132 Abbildung 7.13 gibt in der oberen Zeile noch einmal die Originalszene, den blauen Kanal sowie das Histogramm des blauen Kanals. Die beiden unteren Zeilen enthalten eine lineare Dehnung: in der Gesamtszene (links) wurden alle Kanäle identisch gedehnt, in der Mitte ist das Ergebnis dieser Dehnung für den blauen Kanal gezeigt, rechts das sich für diesen Kanal ergebende Histogramm.

§ 1133 In der mittleren Zeile wurde der Bereich von Helligkeitswerten zwischen 140 und 215 linear auf den Gesamtbereich gedehnt. Dadurch verringern sich die Kontraste in den dunklen Bildpartien während die Kontraste im hellen Bereich erhöht werden. Insbesondere tritt das Höhenprofil des Gletschers deutlicher hervor: die unterschiedlichen Neigungen der Bildelemente führen dazu, dass das reflektierte Licht mit unterschiedlicher Intensität auf den Detektor trifft – allerdings immer mit großer Intensität. Durch die Dehnung werden diese Kontraste hervorgehoben und damit auch die Struktur.

§ 1134 In der unteren Zeile wurde der Bereich zwischen 10 und 100 auf den gesamten Helligkeitsbereich gedehnt. Daher verschwinden die Kontraste im Bereich des Gletschers während

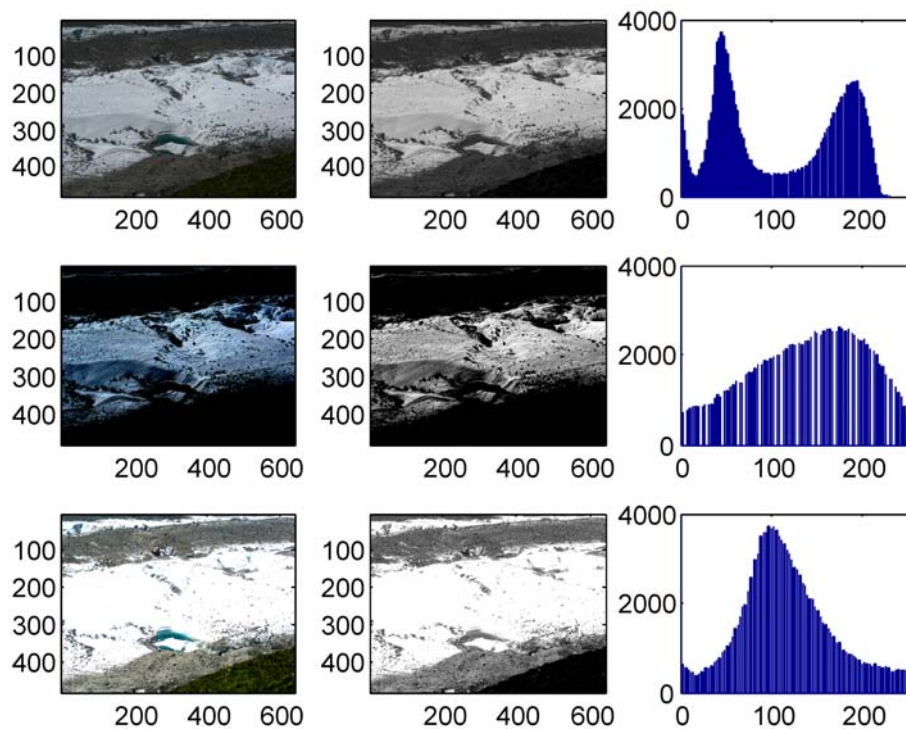


Abbildung 7.13: Lineare Kontrastanreicherung für Abb. 7.12; in der mittleren Zeile wurde der rechte Peak gedehnt, in der unteren der linke

sie im Bereich der Felsen deutlicher hervortreten und die Unterkante des Bildes als Grasbewuchs statt Fels kenntlich wird.

§ 1135 Je nach Fragestellung an das Bild kann sich eine andere Form der Kontrastdehnung als sinnvoll erweisen: ein Glaziologe wird mit dem unteren Verfahren vielleicht nicht so zufrieden sein wie mit dem mittleren, ein Geoökologe dagegen bevorzugt vielleicht eher das untere Verfahren.

7.2.2 Kantenanreicherung

§ 1136 Ein weiteres Verfahren ist die Kantenanreicherung ('edge enhancement'). Hat man einen weißen und einen schwarzen Streifen direkt nebeneinander (wie in dem Teststreifensystem zur Bestimmung des Bodenaufklärungsvermögens), so kann man die Lichtintensität als eine Stufenfunktion darstellen. Auf dem Film wird diese Stufe jedoch in einen kontinuierlichen Übergang transformiert, d.h. die ursprünglich scharfe Begrenzung zwischen den beiden Streifen verwischt etwas. Da aber für jeden Film diese Übertragungsfunktion bekannt ist, kann man eine Rücktransformation vornehmen, die die verwischte Kante wieder in eine scharfe Begrenzung überführt. Ein gutes Beispiel ist in Abbildung 9-13 in Cracknell und Hayes [41] gegeben.

§ 1137 Für digitalisierte Aufnahmen gibt es einige einfache Verfahren zur Kantenanreicherung, die ebenfalls mit Hilfe der in Abb. 7.2 durchgeführten werden kann. Die formale Grundlage für eine effiziente Kantenanreicherung (und letztendlich alle effizienten Korrekturen) ist eine Laplace-Transformation [41, 111].

§ 1138 Bei der technischen Realisierung der Kantenanreicherung sind zwei Verfahren zu unterscheiden: gerichtete und nicht-gerichtete. Gerichtete Kantenanreicherung kann verwendet werden, um z.B. in Nord-Süd-Richtung verlaufende Strukturen zu erkennen. Ungerichtete

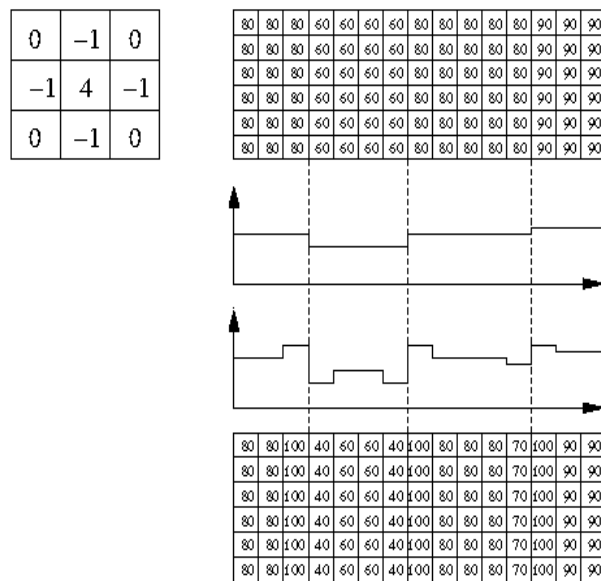


Abbildung 7.14: Ungerichtete Kantenanreicherung: Kernel; Originaldaten, Profil der Originaldaten und der gefilterten Daten und gefilterte Daten

Kantenanreicherung dagegen ist in allen Bereichen sinnvoll, in denen keine Vorinformationen über die Richtung einer möglichen Kante vorhanden sind oder diese sehr variable Richtung haben (z.B. Verkehrsstrukturen). Ungerichtetet Kantenanreicherung ist nichts anderes als die Verwendung eines Hochpass, wie bereits in § 1115 diskutiert.

§ 1139 Ein ungerichteter Filter ist im linken oberen Teil von Abb. 7.14 gegeben: der Helligkeitswert des zentralen Pixels wird vierfach gewichtet, die Helligkeitswerte der direkt benachbarten Pixel jeweils einfach gewichtet abgezogen. Der so gewonnene Filterwert wird zum zentralen Pixel addiert.³ Die obere Zeile von Abb. 7.14 zeigt einen Testdatensatz, die Zeile darunter gibt das Profil der Helligkeitswerte des Originaldatensatzes entlang einer horizontalen Linie. Die folgende Zeile gibt das Profil nach der Kantenanreicherung, darunter der Datensatz nach Kantenanreicherung. In den Originaldaten beträgt der Kontrastunterschied an der linken Kante $80/60 = 1.33$; nach der Kantenanreicherung ist dieses Verhältnis auf $100/40 = 2.5$ erhöht, d.h. nahezu verdoppelt.

§ 1140 Abbildung 7.15 gibt ein Beispiel für eine Kantenanreicherung mit dem Kernel aus Abb. 7.14. Die Kontrasterhöhung an Kanten ist insbesondere im Bereich des Bahnhofs (links unten) und am Flusslauf zu erkennen. An letzterem wird auch deutlich, dass der Kernel eine ungerichtete Kantenanreicherung bewirkt.

§ 1141 Die Kantenanreicherung für Kanten unter einem beliebigen Winkel α beruht ebenfalls auf der Verwendung von zwei 3×3 -Kernen. Der erste Kernel

$$P_y = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{vmatrix}$$

hilft bei der Identifikation horizontaler Strukturen, Kernel

$$P_x = \begin{vmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

³Das ist eine andere Schreibweise aber exakt der erste Hochpass in § 1115 – der Unterschied 4 oder 5 im zentralen Element entsteht dadurch, ob der Kernel einen additiven Beitrag zum Zentralelement liefern oder dieses ersetzen soll. Leider gibt es in der Literatur unterschiedliche Darstellungsweisen; allerdings können Sie sich jeweils selbst klarmachen, was gemeint ist: ist die Summe der Filterelemente Null, so ist es ein additiver Kernel; bei Eins handelt es sich um einen ersetzenden..

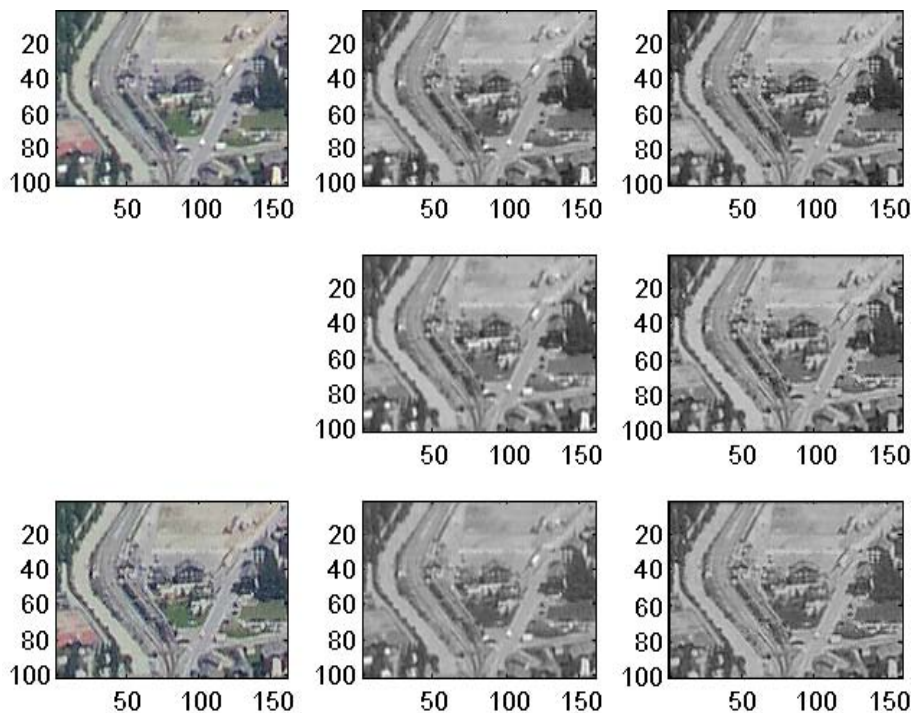


Abbildung 7.15: Szene aus Abb. 7.3 ohne (oben links) und mit (unten links) Kantenanreicherung mit dem Kernel aus Abb. 7.14. Die mittlere Spalte gibt die einzelnen Kanäle im Original, die rechte nach Kantenanreicherung, jeweils oben Rot, Mitte Grün und unten Blau

bei der Identifikation vertikaler Strukturen. Strukturen unter beliebigen Winkeln α werden angereichert mit einem Filter

$$P = \cos \alpha P_1 + \sin \alpha P_2 = \cos \alpha \begin{vmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{vmatrix} + \sin \alpha \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{vmatrix}.$$

Eine diagonal verlaufende Struktur wird entsprechend durch die Kernel

$$P_{45} = \begin{vmatrix} 0 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 0 \end{vmatrix} \quad \text{bzw.} \quad P_{-45} = \begin{vmatrix} -1 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

Auch hier wird der Filterwert zum Originalpixel addiert.

§ 1142 Die Operatoren P werden als Prewitt-Operatoren bezeichnet. Da sie nicht nur die beiden direkt der Kante benachbarten Pixel in einer Linie senkrecht zur Kante berücksichtigen sondern auch die jeweils parallelen Linien, bewirken sie nicht nur eine Kantenanreicherung sondern gleichzeitig auch eine Glättung. Beim Prewitt-Operator ist diese Glättung linear, beim Sobel-Operator wird eine Gauß-Wichtung vorgenommen:

$$S_x = \begin{vmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{vmatrix}, S_y = \begin{vmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{vmatrix},$$

$$S_{45} = \begin{vmatrix} 0 & -1 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \\ 2 & 1 & 0 \end{vmatrix} \quad \text{bzw.} \quad S_{-45} = \begin{vmatrix} -2 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{vmatrix}.$$

§ 1143 Derartige Filter können z.B. zur Identifikation linearer Strukturen verwendet werden, wie auch im Zusammenhang mit Abb. 3.51 diskutiert.

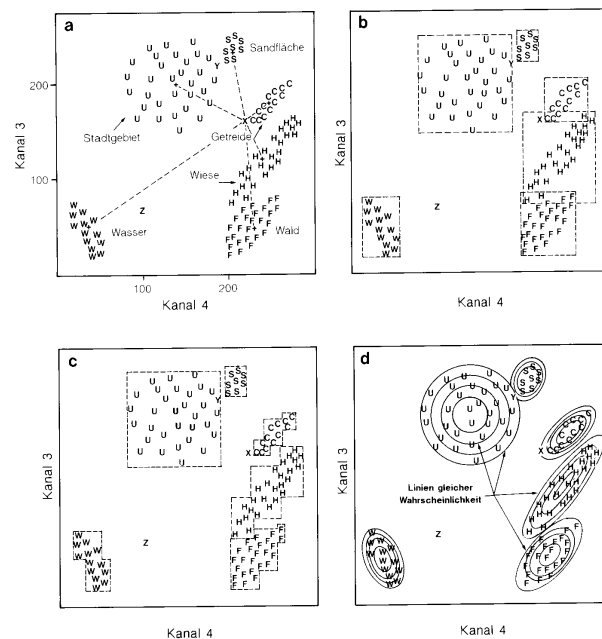


Abbildung 7.16: Zweidimensionale Klassifikationsverfahren [154]

7.3 Automatische Klassifikation

§ 1144 Falschfarbenaufnahmen mit IR-Filmen und später Multispektralaufnahmen und -scanner sollen dazu dienen, Objekte besser klassifizieren zu können als es bei einer Aufnahme im sichtbaren Bereich der Fall wäre. Die einzelnen Spektralkanäle der Instrumente und ihr Bezug zu den Eigenschaften der betrachteten Szene sind bereits im Zusammenhang mit den Instrumenten diskutiert.

§ 1145 Da die Identifikation die Kombination verschiedener Spektralkanäle voraussetzt, ist diese nicht mehr auf visuellem Wege vornehmbar sondern muss auf der Basis der digitalisierten Daten erfolgen – möglichst automatisch.

7.3.1 Distanzverfahren

§ 1146 Die einfachsten automatischen Klassifikationsverfahren sind 2D-Verfahren: hier werden zwei verschiedene Spektralkanäle gegen einander aufgetragen. In Abb. 7.16 wurden dazu die Kanäle 3 (rot) und 4 (nahes IR) des LandSat TM verwendet. In dieser Datenmatrix werden Bereiche markiert, die für bestimmte Aufnahmeobjekte typisch sind: Wasser (W), Stadtgebiet (U), Sandfläche (S), Getreidefelder (C), Wiesen (H) und Wald (F). Da einerseits Beleuchtungsverhältnisse und atmosphärische Transmission von Aufnahme zu Aufnahme wechseln und andererseits die betrachteten Objekte nicht homogen sind, bilden sich in der Datenmatrix relativ große Bereiche aus, in denen die Grauwerte für ein bestimmtes Objekt liegen können.

§ 1147 Mit Hilfe einer derartigen Matrix lässt sich eine automatische Klassifikation unbekannter Szenen vornehmen. Dazu gibt es verschiedene Verfahren:

- bei der *Methode der geringsten Distanz* (Teilbild a) wird der Schwerpunkt Verteilung der Zustandsvektoren eines jeden Objekts gebildet. Für ein zu klassifizierendes Pixel wird der Abstand zu jedem der Schwerpunkte gebildet, das Pixel wird dann dem Schwerpunkt zugeordnet, zu dem es den geringsten Abstand hat. Der maximale Abstand eines zu klassifizierenden Pixels von den Schwerpunkten kann angegeben werden, um bei großen Abständen eine Fehlklassifikation zu verhindern, so bei Pixel Z. Das Verfahren ist rechenstechnisch sehr einfach.

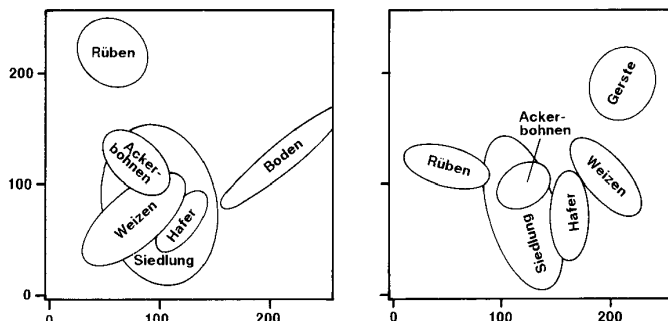


Abbildung 7.17: Unitemporale (links) und multitemporale (rechts) 2D-Klassifikation [154]

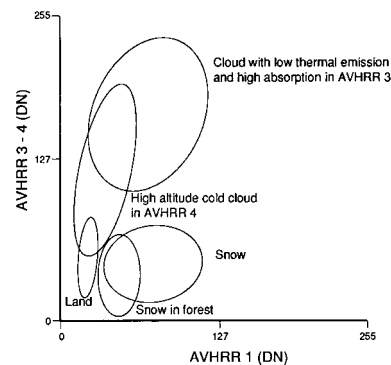
- das *Quader-Verfahren* (Teilbild b) ist rechentechnisch ebenfalls einfach: hier wird jeder klassifizierte Bereich der Datenmatrix mit einem Rechteck umschrieben. Zu klassifizierende Pixel, die in ein derartiges Rechteck fallen, werden dieser Objektklasse zugeordnet; Bildpunkte, die in keines der Rechtecke fallen, werden nicht klassifiziert. Das Verfahren hat den Nachteil, dass Merkmalsgruppen sich nicht zwingend geschickt in ein Rechteck einordnen lassen (z.B. die Wiesen (H)) und sich Rechtecke überlappen können obwohl sich die Merkmalsklassen nicht überlappen (Wiese H und Getreidefeld C).
- das *detaillierte Quaderverfahren* (Teilbild c) ist eine Verfeinerung des Quaderverfahrens bei dem die Merkmalsklasse nicht in ein Rechteck sondern in eine aus mehreren kleinen Rechtecken gebildete Fläche eingeschlossen wird.
- das *Verfahren der größten Wahrscheinlichkeit* (Maximum Likelihood Method) unterscheidet sich von den Quaderverfahren dadurch, dass die Punkte einer Merkmalsklasse nicht gleichberechtigt behandelt werden sondern gewichtet werden. Dies basiert auf der Annahme, dass es einen Mittelwert für die Merkmalsklasse gibt, um den die Punkte in Form einer Normalverteilung schwanken. Dann lassen sich neben dem Mittelwert Linien gleicher Wahrscheinlichkeit festlegen. Dies ermöglicht nicht nur eine Klassifikation wie bei der Methode der geringsten Distanz sondern insbesondere bei überlappenden Merkmalsbereichen auch eine Aussage über die Wahrscheinlichkeit, mit der ein zu klassifizierender Bildpunkt einer oder mehreren Merkmalsklassen angehört. Das Verfahren der größten Wahrscheinlichkeit wird daher, obwohl rechentechnisch aufwendiger, häufig angewendet.

§ 1148 Insbesondere bei Untersuchungen der Vegetation kann eine multitemporale Klassifikation bessere Ergebnisse liefern: eine Birke im Frühjahr mit frischen Blättern erzeugt ein anderes Signal als die gleiche Birke im Sommer mit ausgewachsene Blättern oder gar später im Jahr in Herbstfärbung. Eine Verbesserung der automatischen Klassifikation ergibt sich, wenn die Trainingsmatrix nicht für einen festen Zeitpunkt aufgenommen wird sondern zu verschiedenen Zeiten über die Vegetationsperiode verteilt. Als Beispiel zeigt Abb. 7.17 die Streuellipsen (Kurven fester Wahrscheinlichkeit beim Verfahren größter Wahrscheinlichkeit) im Merkmalsraum für verschiedene Landnutzungsklassen in unitemporaler (links) und multitemporaler (rechts) Auswertung. Generell ist bei der multitemporalen Auswertung eine bessere Trennung der verschiedenen Nutzungsklassen möglich – offensichtlich in der geringeren Überlappung der Streuellipsen.

Beispiel: Klassifikation von Schnee

§ 1149 Auf den ersten Blick sollte die Identifikation der Schneebedeckung in Satellitenbildern ein triviales Problem sein: Schnee ist weiß und reflektiert den größten Teil der auf ihn auftreffenden solaren Strahlung (Albedo zwischen 75% und 90%). Damit sollte er sich im sichtbaren Spektrum hell abzeichnen, d.h. durch einfache Betrachtung einer Schwarzweiß- oder Farbaufnahme erkennbar sein. Das ist korrekt, solange man nur die Bodenbedeckung betrachtet. Dass die Identifikation von Schneeflächen in der Realität jedoch schwieriger ist, kann man bei einem Blick auf eine normale MeteoSat-Aufnahme sofort nachvollziehen: außer Schnee haben auch Wolken ein sehr hohes Reflektionsvermögen, d.h. auch diese zeichnen

Abbildung 7.18: Klassifikation ‘weißer’ Pixel in den AVHRR-Daten zur Unterscheidung zwischen Schnee und Bewölkung [155]



sich auf den Aufnahmen als sehr helle Bereiche ab. Handelt es sich bei den Wolken um stark strukturierte Wolkengebilde (weit in die Troposphäre aufragende Gewitterwolken oder Wolkenwirbel im Zusammenhang mit einem Tiefdruckgebiet) so sind sie als solche zu identifizieren. Handelt es sich jedoch um eine gleichmäßige Bedeckung mit niedrigen Wolken, so ist eine Unterscheidung zwischen Wolken und Schnee kaum möglich. Hier kann man sich wieder, wie im Falle der Bodennutzung, mit Klassifikationsbereichen (in Abb. 7.19 dargestellt als Cluster, in Abb. 7.18 als Ellipsen) weiterbehelfen. Verwendet wird dabei ein im sichtbaren Bereich arbeitender Kanal (Kanal 1) des AVHRR sowie die Differenz aus zwei im thermischen Infrarot arbeitenden Kanälen. Der Kanal 3 ($3.55 \mu\text{m} - 3.93 \mu\text{m}$) ist empfindlich sowohl für die reflektierte solare Strahlung als auch für die emittierte terrestrische Wärmestrahlung. Hier erscheint Schnee extrem dunkel. Zwar erscheinen auch Wolken dunkel, allerdings mit einer leichten Abweichung. Auch im Kanal 4 bestehen geringe Unterschiede zwischen Wolken und Schnee. Durch Differenzbildung zwischen den beiden Kanälen werden diese Unterschiede deutlicher hervorgehoben. Daher wird auch die Differenz für die Klassifikationsellipsen verwendet. Betrachtet man diese Klassifikationsellipsen in Abb. 7.18, so wird die Ähnlichkeit von Wolken und Schnee im sichtbaren Bereich (Kanal 1) sofort deutlich, während die Unterschiede zwischen Wolken und Schnee durch den Differenzkanal im Infraroten definiert werden.

7.3.2 Mehrdimensionale Klassifikationsverfahren

§ 1150 Mehrdimensionale Klassifikationsverfahren basieren auf den bereits von den 2D-Verfahren bekannten Ideen. Die Identifikation von Schnee in den AVHRR-Daten ist ein Hybrid-Verfahren: die Klassifikationsmatrix ist zweidimensional, die Informationen stammen jedoch aus drei Kanälen, da auf einer Achse nicht die Helligkeitswerte eines Kanals sondern die Differenz der Helligkeitswerte zweier Kanäle betrachtet wird.

§ 1151 Ein Beispiel für die Bestimmung der Bodennutzung in einem relativ eng begrenzten Gebiet zeigt Abb. 7.19. Die Zielsetzung ist dabei eine einfachere gewesen als bei der Bestimmung der globalen Vegetationsverteilung: Untersucht werden sollte ein Teil des Imperial Valley und Salton Sea in Kalifornien im Hinblick auf die Bodennutzung. Im oberen linken Teil von Abb. 7.19 ist zur Orientierung eine Aufnahme des LandSat MSS im Band 5 (grün) gezeigt, im unteren Teil die Klassifizierung entsprechend der Bodennutzung als (A) landwirtschaftlich genutzte Fläche, (D) Wüste, (M) Berge und (W) Wasser. Nichtmarkierte Pixel ließen sich nicht identifizieren. Durch Vergleich mit der Aufnahme darüber erkennt man, dass es sich bei diesen unidentifizierten Pixeln praktisch ausschließlich um Pixel in der Nähe von Begrenzungen handelt, d.h. sie werden wahrscheinlich Mischpixel sein.

§ 1152 Wie nimmt man aber eine solche Klassifikation vor? Wir hatten im Zusammenhang mit dem Vegetationsindex gesehen, dass dieser aus den Intensitäten im Roten und im Infraroten Kanal definiert wird. Zur Bestimmung der Flächennutzung beim LandSat MSS bedient man sich eines etwas genaueren Verfahrens: Es werden die Intensitäten der drei Bänder 4, 5 und 6 (entsprechend grün, rot und einem Kanal im nahen Infrarot) gegeneinander aufgetragen (Abb. 7.19 rechts unten). Entsprechend der unterschiedlichen spektralen Reflektionskur-

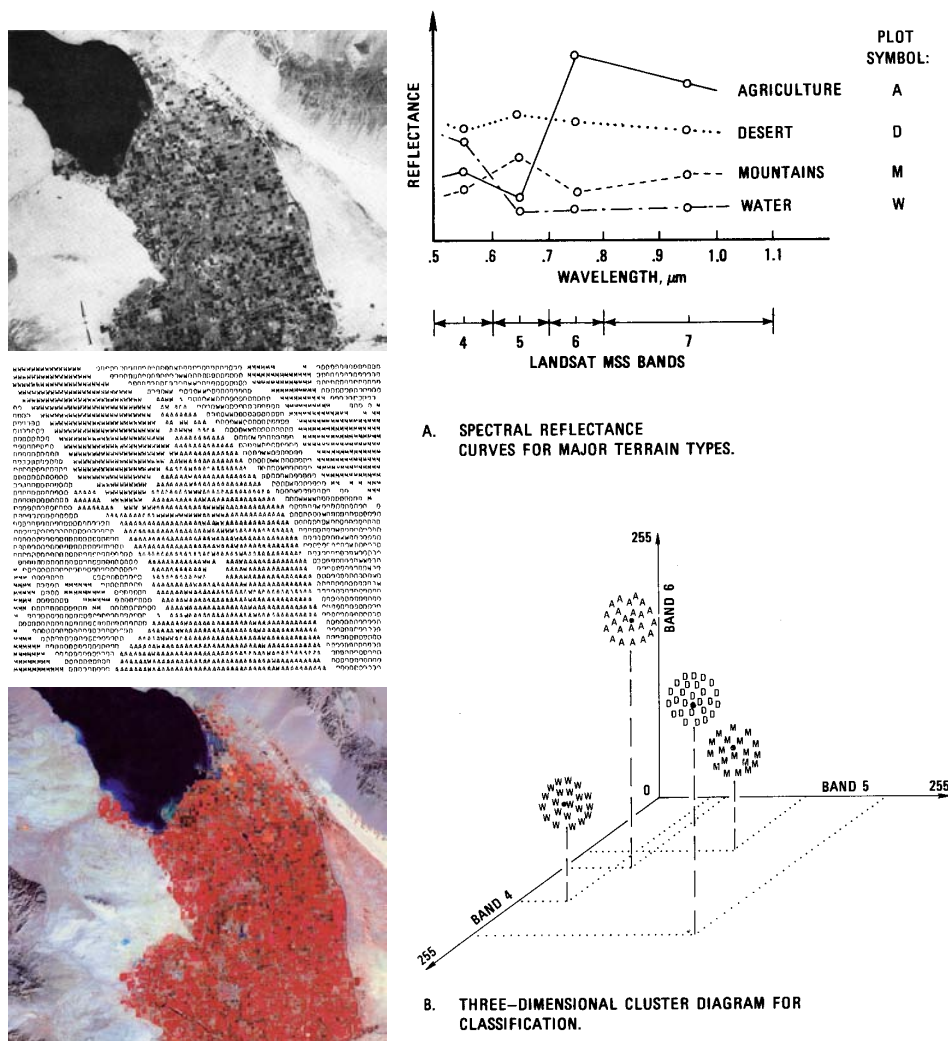


Abbildung 7.19: Klassifikation der Bodennutzung mit LandSat MSS Daten für das Imperial Valley und Salton Sea in Kalifornien. Links oben MSS Band 5 (grün), Mitte und unten die sich durch Vergleich verschiedener Spektralkanäle ergebende Geländeklassifikation. Rechts: Spektrales Reflektionsvermögen für verschieden genutzte Flächen (oben) sowie ein Clusterdiagramm zur Klassifizierung der einzelnen Bildpunkte [209]

ven sammeln sich die typischen Punkte von Vegetation, Wasser und anderen Geländetypen jeweils in Clustern. Zu jedem einzelnen Pixel der Scanner-Aufnahme wird nun in diesem Diagramm das Cluster gesucht, zu dem der Punkt mit der größten Wahrscheinlichkeit gehört bzw. dem er am nächsten liegt. Verschiedene mögliche Verfahren dieser Zuordnung sind für den vereinfachten zweidimensionalen Fall oben beschrieben.

§ 1153 Der in Abb. 7.19 gezeigte Bereich ist einfach zu klassifizieren, da er aus relativ großen Flächen mit einheitlichen Merkmalen besteht. Insbesondere die kleinräumigen rechteckigen Strukturen im Tal lassen sich unschwer als vom Menschen manipulierte Bereiche erkennen. Damit kann man die Klassifizierung in landwirtschaftlich genutzte Fläche aber auch ohne genaue Untersuchung ‘von Hand’ bzw. mit dem Auge vornehmen. Die Wasserläufe innerhalb der landwirtschaftlich genutzten Flächen lassen sich auf der Aufnahme im sichtbaren Bereich allerdings nur schwer erkennen, sie zeigen sich erst im Vergleich der verschiedenen Kanäle eindeutig. Die sehr unterschiedlichen Helligkeitswerte der verschiedenen landwirtschaftlich genutzten Flächen in der MSS Aufnahme zeigen aber auch, dass die Cluster im Klassifikati-

onsdiagramm nicht gerade klein werden und man wirklich mehrere Kanäle verwenden muss, um eine einigermaßen zuverlässige Klassifikation zu erreichen.

§ **1154** Vegetationsuntersuchungen müssen nicht notwendigerweise so kompliziert durchgeführt werden. Um sich z.B. einen Eindruck über das Ausmass des Abholzens tropischer Regenwälder zu verschaffen, ist eine einfache Betrachtung der Aufnahmen z.B. in einem Kanal im nahen Infrarot ausreichend, ein Beispiel hierfür gibt Abb. 3.27.

7.4 Managing Gigabytes

§ **1155** Bisher haben wir Satellitendaten als Images betrachtet derart, dass jedem Pixel pro Kanal ein Helligkeitswert zugeordnet ist. Mit einer bescheidenen Bildgröße von 2560 mal 1920 Pixel mit einer Farbtiefe von 24 Bit bzw. 8 Bit für jeden der drei Kanäle ergibt sich ein Bitmap von 117 MBit oder knapp 15 MB. Bei einer Szene pro Minute entspricht das unkomprimiert einer Datenmenge von knapp 1 GB, d.h. eine Speicherung als Bitmap ist nicht sinnvoll.

§ **1156** Die Kompression von Bilddaten kann unter verschiedenen Gesichtspunkten erfolgen, eine Übersicht gibt [255]. Kompressionsverfahren können unterteilt werden in verlustfreie und verlustbehaftete Verfahren: in ersteren wird die vollständige, im Bild enthaltene Information codiert und entsprechend auch decodiert, in letzterem wird ein Teil der enthaltenen Information selektiv nicht codiert – entsprechend ist das Bild nach der Decodierung mit Verlusten behaftet.

7.4.1 Verlustfreie Bildformate

§ **1157** Standardformate zur Verlust freien Speicherung von Bilddaten sind GIF (Graphics Interchange Format) und PNG (Portable Network Graphics). Beide Verfahren basieren auf einem modifizierten Lempel–Ziv-Algorithmus, d.h. die Kompression ist ähnlich, als würde man ZIP auf ein Bitmap-Bild anwenden.

§ **1158** Im Gegensatz zu GIF erlaubt PNG optional ein weiteres Element der Kompression, die Kontext-basierte Kodierung. Dazu werden vor der Komprimierung einige Filter verwendet, z.B. ein horizontaler Differenzfilter, bei dem statt des Pixelwerts nur die Differenz zum Wert des Nachbarpixels bestimmt und kodiert wird; das Verfahren verfolgt also ähnliche Ansätze wie die Lauflängencodierung beim Fax. Da normalerweise in einer Szene benachbarte Pixel auch ähnliche Werte haben, treten viele kleine und wenige große Differenzen auf. Bei entsprechende Codierung, z.B. Huffman, ist das über die Differenzen gebildete Bild in codierter Form kleiner als das Original. Statt einer horizontalen Filters lässt sich auch ein vertikaler Filter verwenden oder ein mittlerer Filter, der die Differenz zum darüber und zum links davon liegenden Pixel bestimmt.

§ **1159** Für Grauskalenbilder ist FELICS ein weiteres Verlust freies Komprimierungsverfahren. Auch FELICS ist Kontext-basiert, berücksichtigt aber im Gegensatz zu PNG nicht nur den direkt benachbarten Pixel sondern 2 benachbarte Pixel. Da FELICS auf einem festen Codierungsschema basiert, kann es niemals besser komprimieren als 1 Bit pro Pixel.

7.4.2 Und JPEG?

§ **1160** JPEG (Joint Photographic Experts Group) ist ein weit verbreiteter Standard der Bildkomprimierung – allerdings ist JPEG für unsere Fragestellungen nicht geeignet, da JPEG ein Verlust behaftetes Verfahren zur Datenkompression ist. Eine Verlust freie Variante, JPEG-LS, wird in Witten et al. [255] diskutiert.

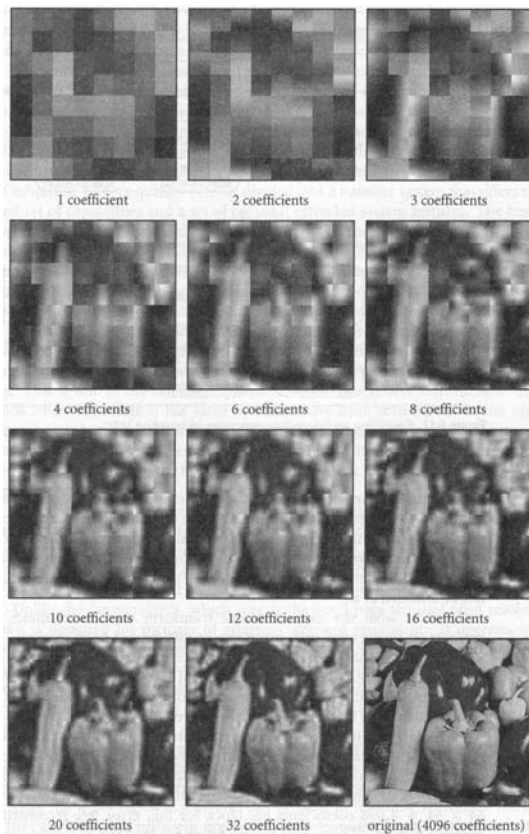


Abbildung 7.20: JPEG-Codierung und Decodierung für unterschiedliche Zahl der berücksichtigten Koeffizienten [255]

§ **1161** JPEG ist ein Transformations-Codierungsverfahren, d.h. zuerst wird das Bild transformiert, anschließend wird die Transformation codiert. Die Decodierung erfolgt entsprechend: die eigentliche Decodierung liefert die Transformation des Bildes, dieses wird anschließend rücktransformiert.

§ **1162** Als Transformation wird bei JPEG eine diskrete Kosinustransformation auf ein $N \times N$ -Pixel großes Bild mit den Helligkeitswerten x :

$$\begin{aligned}
 X(0,0) &= \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N x(i,j) \\
 X(u,v) &= \frac{2}{N} \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N x(i,j) \cos\left(\frac{2(i+1)u\pi}{2N}\right) \cos\left(\frac{2(j+1)v\pi}{2N}\right)
 \end{aligned} \tag{7.2}$$

mit $X(0,0)$ als dem Gleichstromanteil und $X(u,v)$ mit $u, v \neq 0$ als dem Wechselstromanteil.

§ **1163** Ein reales Bild wird zuerst in 8×8 Pixel große Untermatrizen zerlegt.⁴ Auf diese Untermatrix wird die Kosinustransformation angewandt, so dass sich für jede Untermatrix 64 Koeffizienten $X(0,0)$ bis $X(7,7)$ ergeben. Da JPEG komprimieren soll, wird nur den niederfrequenten Anteilen der Transformation eine Bedeutung beigemessen. Bis zu welcher Ordnung diese Anteile gerücksichtigt werden sollen, bestimmt einerseits die Bildqualität und andererseits den Grad der Komprimierung. Diese unteren Koeffizienten werden mit einem Huffman-Verfahren codiert.

⁴Ist die Kantenlänge kein Vielfaches von 8, so wird zum Auffüllen der fehlenden Zeilen bzw. Spalten die jeweils letzte Zeile oder Spalte wiederholt.

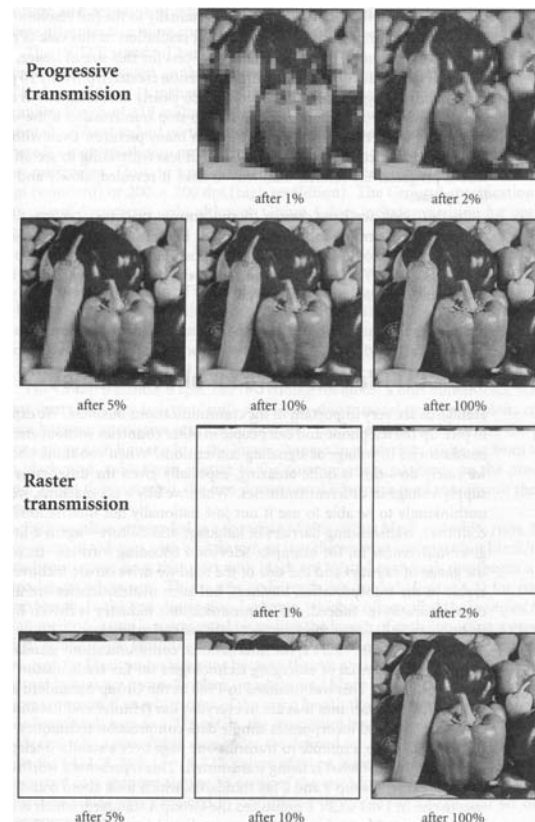


Abbildung 7.21: Progressive und Raster-Datenübertragung

§ 1164 Abbildung 7.20 zeigt die Abhängigkeit des reproduzierten JPEG-Bildes von der Zahl der berücksichtigten Koeffizienten. Dazu wurde ein 512×512 -Pixel großes Bild in ein 8×8 -Raster von 64×64 -Pixel großen Untermatrizen zerlegt. Diese relativ großen Untermatrizen wurden gewählt, da sich mit ihnen die Abweichungen vom Original besser verdeutlichen lassen.

§ 1165 Aus dem Vergleich der Teilbilder wird deutlich, dass der Großteil der Information in den untersten Koeffizienten steckt – bereits mit 20 der 4096-Koeffizienten lässt sich ein Bild erzeugen (links unten), das die relevante Struktur des Originalbildes wieder gibt. Die höheren Koeffizienten verbessern nur noch den Detailreichtum.

§ 1166 Während die Helligkeitswerte im Originalbild mit mindestens 8 bit/Pixel und Kanal codiert sind, lassen sich bei einer JPEG-Codierung mit Raten von 0.2–0.5 Bit/Pixel bereits mäßige bis gute Bildqualitäten erreichen. Bei einer Codierung mit 0.5–0.75 Bit/Pixel ist die Bildqualität bereits gut bis sehr gut, bei 1.5–2 Bit/Pixel unterscheidet sich das Bild nicht mehr vom Original.

§ 1167 Die Wirksamkeit aller Komprimierungs- aber auch Korrekturverfahren beruht darauf, dass die Helligkeitswerte einzelner Pixel nicht völlig unabhängig sind und damit die Redundanz im Datensatz relativ groß ist. Ein Bild, in dem die Pixel statistisch erzeugt wurden, lässt sich weder sinnvoll korrigieren noch komprimieren.

§ 1168 JPEG wird genauer beschrieben in [188], Witten et al. [255] und [249]; letztere beschreiben auch andere gebräuchliche (und ebenfalls verlustbehaftete) Kompressionsalgorithmen wie MPEG und MP3.

§ 1169 JPEG-Codierung ist für Fernerkundungsinstrumente unter den Umständen geeignet, in denen das räumliche Auflösungsvermögen nicht voll ausgenutzt werden muss – allerdings kann dann eine initiale Reduktion der Daten durch Mittelung sinnvoller sein.

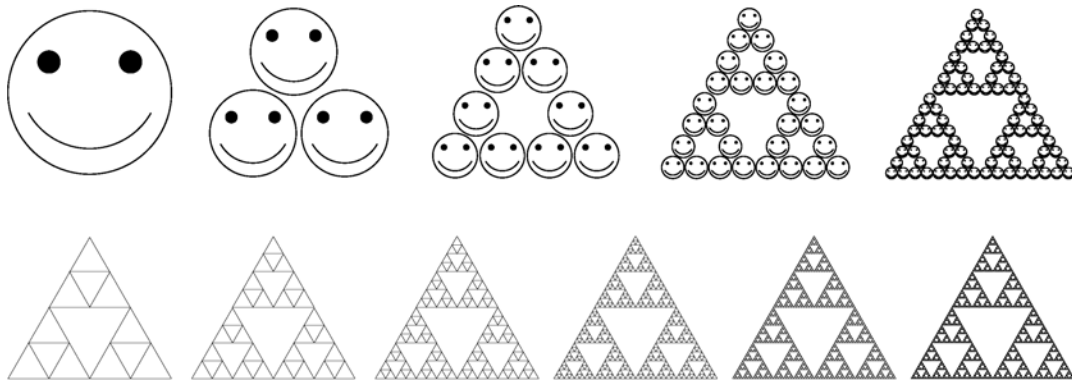


Abbildung 7.22: Fraktale Bilderzeugung: das Ausgangsbild (links) wird beim Kopieren verkleinert und es werden drei Kopien wie ein Dreieck zusammen gesetzt (2tes Bild von links). Der Vorgang wird mit der so entstandenen Kopie wiederholt. Die untere Zeile das Sierpinsky-Dreieck

§ 1170 Auch wenn verlustbehaftete Verfahren wie JPEG bei der Speicherung von Bitmaps zwar eine hohe Komprimierung aber dafür einen Verlust an Information bedeuten, können derartige Komprimierungsverfahren für die Übertragung von Bildern auf Kanälen mit geringer Übertragungsrate sinnvoll sein. Ein als Bitmap gespeichertes Bild wird als Raster Punkt für Punkt übertragen, es baut sich also langsam auf, in dem jeweils ein Bildpunkt neben den anderen gesetzt wird, Zeile für Zeile (vgl. Abb. 7.21 unten). Diese Übertragungstechnik wird als raster transmission oder Rasterübertragung bezeichnet; bei geringer Übertragungsrate sieht man dem Bild beim Wachsen zu. Die Daten eines JPEG-Bildes dagegen erzeugen einen ganz anderen Bildaufbau. Da bei der progressive transmission bzw. progressiven Datenübertragung nicht Pixel sondern Koeffizienten einer Transformation übertragen werden, entsteht bereits nach der Übertragung des ersten Koeffizienten ein vollständiges, wenn auch extrem grobes Bild (Abb. 7.21 oben). Mit der Übertragung der weiteren Koeffizienten verändert sich nicht mehr die Geometrie des Bildes sondern seine Detailtiefe. Das hat z.B. für die schnelle Darstellung von Bildern im Internet Vorteile.

§ 1171 Bei der Übertragung über unsichere Kanäle, insbesondere die Unterbrechung einer Übertragung, liefern beide Verfahren völlig unterschiedliche Resultate: Bei der Rasterübertragung sind die bisher übertragenen Pixel alle exakt wieder gegeben – möglicherweise wissen wir dann über einen völlig uninteressanten Teil der Szene sehr genau Bescheid. Bei der progressiven Übertragung dagegen wird die Szene insgesamt erst einmal grob übertragen – für den Überblick sicherlich gut, auch wenn die Details noch fehlen.

7.4.3 Fraktale Bildkompression

§ 1172 Die bisher betrachteten Verlust freien Codierungsverfahren basieren auf dem Kontext zwischen benachbarten Pixeln sowie einer geschickten Huffman- oder Lempel-Ziv-Codierung dieser Ergebnisse. Fraktale Bildkompression wählt einen radikaleren Ansatz bei der Erzeugung der zu codierenden Sequenz: hier wird der Bezug zwischen größeren Teilen des Bildes hergestellt, in dem selbst-ähnliche Abschnitte identifiziert werden. Die Grundzüge dieser Verfahren sind in Fisher [57] dargestellt.

§ 1173 Fraktale Bildkompression setzt die Existenz selbstähnlicher Bereiche voraus. Selbstähnliche Bereiche zeigen auf allen räumlichen Skalen die gleiche Struktur: vergrößern wir eine Küstenlinie immer weiter, so zeigt jeder neue Ausschnitt eine ähnliche Struktur. Selbstähnliche Abbildungen haben keine natürliche Größe und lassen sich daher auf beliebige Formate vergrößern ohne dass, wie bei GIF und den anderen Formaten, die Pixel als solche sichtbar werden.

§ 1174 Die Grundidee der fraktalen Bildkompression lässt sich am leichtesten verstehen, wenn wir von der Bildrekonstruktion starten. Abbildung 7.22 illustriert das Abbildungsprinzip: das Ausgangsbild wird beim Kopieren skaliert und nach einem festen Schema wieder zusammengesetzt. In diesem Beispiel wird jeweils drei um einen Faktor 2 verkleinerte Kopien erstellt und in Form eines Dreiecks zusammen gesetzt. Mit jeder weiteren Kopie bleibt die Grundform, das Dreieck, unverändert während sich innerhalb der Struktur immer feinere Details ausbilden. Mit zunehmender Zahl der Kopien sind diese Details jedoch kaum noch wahrnehmbar: jedes der Sierpinsky-Dreiecke im rechten Teil der unteren Zeile zieht gleich aus – und vergrößern wir eines der Dreiecke, so finden wir jeweils seinen Vorgänger darin wieder.

§ 1175 Fraktale Bildkonstruktion basiert daher auf einem einfachen Satz von Regeln:

1. von einem Bild wird eine vorgegebenen Zahl von Kopien erstellt,
2. diese Kopien werden nach einem vorgegebenen Regelwerk zusammengesetzt, wobei für jede Kopie Position, Skalierungsfaktoren (Verkleinerung, Verzerrung) und Rotationswinkel vorgegeben sind.⁵

§ 1176 Aus dem Prinzip der Bildkonstruktion können wir die Anforderung für die Bildkompression ableiten: es müssen Abschnitte des Bildes identifiziert werden, die selbstähnlich sind. Für diese Abschnitte muss die Grundfigur bestimmt werden und die Konstruktionsregeln. Idealerweise finden sich in einem Bild mehrere selbstähnliche Abschnitte, die aus der gleichen Grundfunktion konstruiert werden können. Daher muss zusätzlich zu den oben gegebenen Kopierregeln eine Anpassung von Kontrast und Helligkeit gegeben werden sowie eine Maske, die die Bereiche des Originals markiert, die durch diese Kopien ersetzt werden können.

§ 1177 Fraktale Bildkompression unterscheidet sich von den anderen Kompressionsverfahren durch eine Eigenschaft der Fraktale: da Fraktale auf jeder Längenskala Details zeigen, hat das decodierte Bild keine eigene Größe sondern kann in beliebiger Größe erzeugt werden. Mit zunehmender Größe des decodierten Bildes werden mehr Abbildungsschritte durchlaufen und damit mehr Details hinzu gefügt. Allerdings sind diese Details nicht real, sie erzeugen jedoch einen besseren optischen Eindruck als die bei der Vergrößerung eines Bitmaps entstehende körnige Struktur.

§ 1178 Fraktale Bildkompression ist ein verlustbehaftetes Verfahren, allerdings sind die Kompressionsraten wesentlich größer als z.B. bei JPEG und auf Grund der nicht vorhandenen Körnigkeit der optische Eindruck besser. Bisher hat sich fraktale Bildkompression nicht durchgesetzt, die hohen Kompressionsraten bei im Vergleich zu JPEG geringem Informationsverlust könnten das Verfahren jedoch auch für die Erdfernerkundung attraktiv machen: zum einen haben z.B. Küstenlinien, Flussläufe und Gebirge selbstähnliche Strukturen, zum anderen ist eines der Hauptprobleme der fraktalen Bildkompression, die Identifikation der selbstähnlichen Bereiche in einem Bild nicht ganz so gravierend, da in der Erdfernerkundung die gleichen Szenen immer wieder aufgenommen werden und damit Masken vorgegeben werden können bzw. Netze gut auf eine automatische Identifikation trainiert werden können.

⁵Die Kopien müssen nicht so einfach zusammengesetzt werden wie in Abb. 7.22 sondern können bei geeigneter Skalierung auch Gebilde erzeugen wie z.B. den Barnsley Farn, hier in einer Abbildung von <http://obelix.polito.it/Tesi/Lug99/Mereu/default.htm>



Literatur

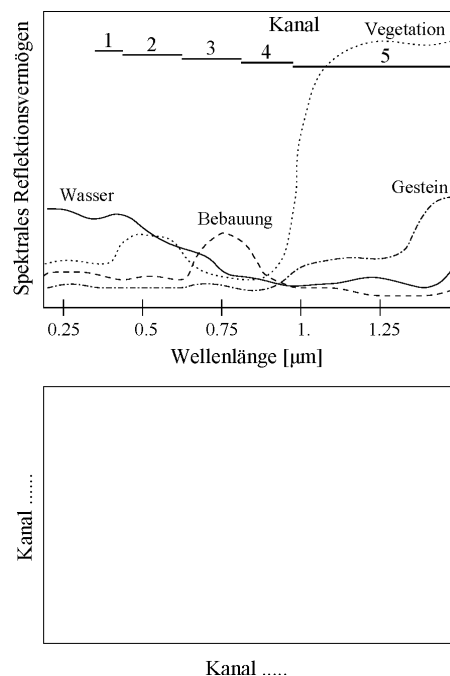
§ 1179 Eine gute Darstellung der theoretischen Grundlagen der Verfahren zur digitalen Bildverarbeitung gibt Jähne [111], Bildbearbeitung für Satelliteninstrumente wird diskutiert in Sabins [209], Cracknell und Hayes [41] und teilweise auch Löffler [154]. Eine gute Einführung, wenn auch mit Anwendungsbeispielen aus der Medizin, gibt auch Handels [88]; die Variante zum selber Hand anlegen liefert [180].

Fragen

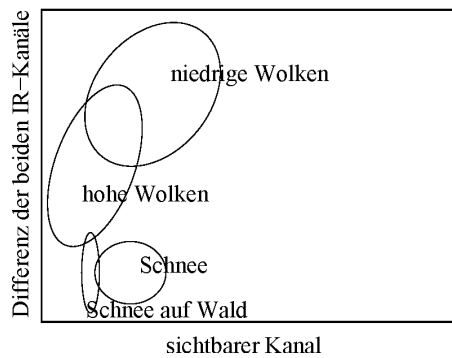
Frage 75 Was versteht man unter Kontrastanreicherung? Beschreiben Sie Möglichkeiten zur Kontrastanreicherung.

Frage 76 Satelliten liefern sehr große Datenmengen. Daher ist eine automatische Dateninterpretation erforderlich. Erläutern Sie Methoden, wie aus den Daten eines Multispektralscanners (z.B. Thematic Mapper oder MultiSpectralScanner auf LandSat) zumindest eine Grobunterteilung (z.B. in Wasser, landwirtschaftlich genutzte Fläche usw.) erfolgen kann.

Frage 77 In der folgenden Abbildung ist das spektrale Reflektionsvermögen für verschiedene Objekte auf dem Boden gezeigt. Konstruieren Sie daraus ein Cluster-Diagramm, das eine Identifikation von Wasser, Gestein, Bebauung und Grünfläche auf der Basis der Kombination von drei Kanälen erlaubt (drei-dimensionales Zeichnen ist ein Problem, tragen Sie zwei Kanäle in das untere 2D-Diagramm ein und erläutern Sie den dritten verbal – z.B. die beiden Cluster liegen in der Projektion auf 2D zwar aufeinander, sind aber entlang der dritten Dimension eindeutig getrennt). Welche Kanäle wählen Sie? Ist eine Unterscheidung zwischen Wasser und Bebauung unter Verwendung von nur zwei Kanälen möglich?



Frage 78 Die folgende Abbildung zeigt ein Clusterdiagramm zur Klassifikation weißer Punkte in den AVHRR-Daten zur Unterscheidung von Schnee und Bewölkung. Verwendet wurden Informationen aus einem sichtbaren Kanal sowie die Differenz der beiden Kanäle im thermischen Infrarot. Welche weiteren Informationen (auch von anderen Instrumenttypen) könnte man verwenden, um eine genauere Unterscheidung zu erhalten?



Aufgaben

Aufgabe 32 Bei der Nachbearbeitung der Bilder am Boden müssen fehlerhafte Pixel erkannt und entfernt werden. Beschreiben Sie das Verfahren und führen Sie es an folgendem Beispiel durch (Hinweis: die Fehler sind ‘offensichtlich’):

34	24	36	30	28	27	30	25	33	32	26	33	32	23	29	32	51	25	30	34
26	33	25	33	35	24	33	23	26	29	30	31	33	27	29	28	25	27	25	36
31	23	27	26	23	35	35	28	33	24	36	32	30	26	34	36	23	24	28	35
33	31	30	28	26	26	30	35	27	23	55	27	28	31	26	32	34	36	33	25
29	27	34	24	35	32	29	25	28	24	26	34	29	35	35	26	32	31	23	36
31	24	29	32	25	34	32	35	23	25	34	24	24	29	27	29	25	28	24	29
36	35	32	33	36	24	33	36	25	32	24	36	32	28	31	36	23	33	31	30
25	26	44	29	32	25	31	29	27	28	32	34	33	28	32	30	76	24	29	34
31	28	24	36	28	35	36	31	26	31	36	24	28	30	29	28	34	34	36	33
33	23	34	28	33	28	24	33	32	28	26	34	27	33	27	32	30	36	24	26

Aufgabe 33 Bei der Fehlerkorrektur in folgendem Beispiel (99 bezeichnet die fehlerhaften Werte) können Sie wahlweise einen 3x3 oder einen 5x5 Kernel verwenden. Welcher produziert die besseren Ergebnisse und warum?

34	24	36	30	28	27	30	25	33	32	26	33	32	23	29	32	51	25	30	33
26	33	25	33	35	24	33	23	26	29	30	31	33	27	29	28	25	27	25	49
31	23	27	26	23	35	35	28	33	24	36	32	30	26	34	36	23	62	55	56
33	31	30	99	26	26	30	26	27	23	31	27	28	31	26	49	48	50	62	52
29	27	34	24	35	32	29	25	28	32	26	28	29	58	56	53	66	63	54	53
31	24	29	32	25	34	32	35	23	25	34	99	51	60	55	62	50	58	48	63
36	35	32	33	36	24	33	36	25	66	48	54	48	55	54	52	54	49	53	49
25	26	35	29	32	25	31	57	54	55	63	65	49	52	49	57	52	99	51	52
31	28	24	36	28	52	63	49	65	51	55	61	50	63	65	63	48	55	60	58
33	23	34	63	51	58	57	64	49	54	49	60	54	54	57	60	56	65	56	54

Aufgabe 34 Bei der Fehlerkorrektur in folgendem Beispiel können Sie wahlweise einen 3x3 oder einen 5x5 Kernel verwenden (fehlerhafte Pixel sind bereits markiert). Welcher produziert die besseren Ergebnisse und warum?

34	24	36	30	28	27	30	25	33	32	26	33	32	23	29	32	51	25	30	34
26	33	25	33	35	24	33	23	26	29	30	31	33	27	29	28	25	27	25	36
31	23	27	26	23	35	35	28	33	24	36	32	30	26	34	36	23	24	28	35
33	31	30	28	26	26	30	69	27	23	55	27	28	31	26	32	34	36	33	25
29	27	34	24	35	32	29	25	28	78	26	76	29	35	35	26	32	31	23	36
31	24	29	32	25	34	32	44	23	25	34	24	24	29	27	29	25	28	24	29
36	35	32	33	36	24	33	36	25	32	24	36	32	28	31	36	23	33	31	30
25	26	35	29	32	25	31	29	27	28	32	34	33	28	32	30	34	24	29	34
31	28	24	36	28	35	36	31	26	31	36	24	28	30	29	28	34	34	36	33
33	23	34	28	33	28	24	33	32	28	26	34	27	33	27	32	30	36	24	26

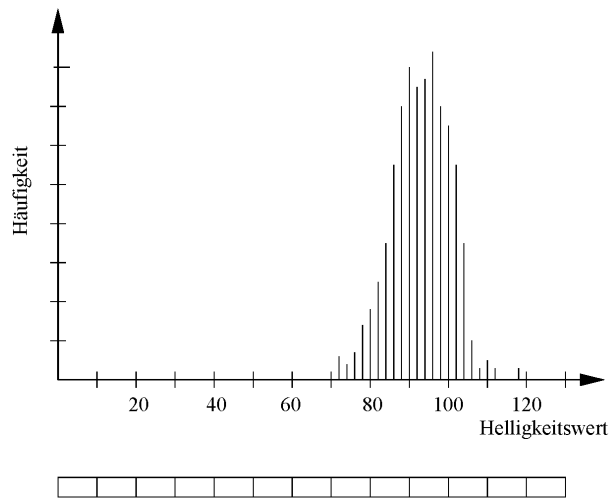
Aufgabe 35 Korrigieren Sie die folgenden, mit einem Spaltenfehler behafteten ‘Rohdaten’ (Schema erläutern und für die ersten vier Zeilen durchführen).

34	24	36	30	28	27	30	25	33	32	26	33	32	23	29	32	99	25	30	34
26	33	25	33	35	24	33	23	26	29	30	31	33	27	29	28	99	27	25	36
31	23	27	26	23	35	35	28	33	24	36	32	30	26	34	36	99	24	28	35
33	31	30	28	26	26	30	35	27	23	33	27	28	31	26	32	99	36	33	25
29	27	34	24	35	32	29	25	28	24	26	34	29	35	35	26	99	31	23	36
31	24	29	32	25	34	32	35	23	25	34	24	24	29	27	29	99	28	24	29
36	35	32	33	36	24	33	36	25	32	24	36	32	28	31	36	99	33	31	30
25	26	28	29	32	25	31	29	27	28	32	34	33	28	32	30	99	24	29	34
31	28	24	36	28	35	36	31	26	31	36	24	28	30	29	28	99	34	36	33
33	23	34	28	33	28	24	33	32	28	26	34	27	33	27	32	99	36	24	26

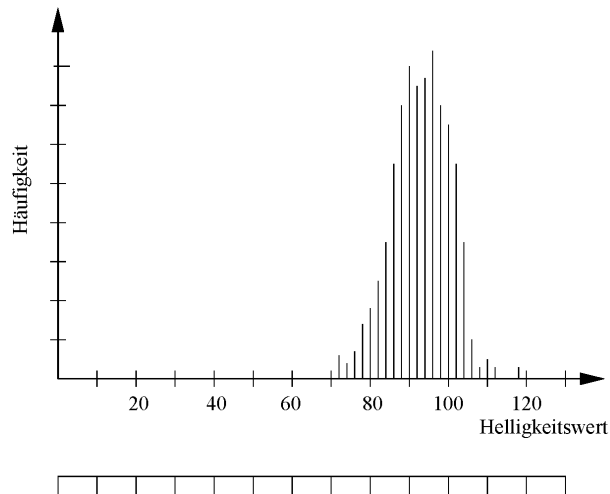
Aufgabe 36 In der folgenden Abbildung ist eine relativ scharfe Begrenzung (zwischen 5. und 6. Zeile) zwischen zwei Bereichen zu erkennen. Arbeiten Sie diese Grenze mit Hilfe der Kantenanreicherung stärker heraus und tragen Sie ihre Ergebnisse im fett umrandeten Bereich des rechten Teilbild ein.

34	24	36	30	28	27	30	25	33	32	34	24	36	30	28	27	30	25	33	32
26	33	25	33	35	24	33	23	26	29	26	33	25	33	35	24	33	23	26	29
31	23	27	26	23	35	35	28	33	24	31	23	27	26	23	35	35	28	33	24
33	31	30	28	26	26	30	35	27	23	33									23
29	27	34	24	35	32	29	25	28	24	29									24
52	61	54	57	54	59	55	50	48	51	52									51
52	60	49	50	53	49	50	59	57	61	52									61
56	48	60	55	62	57	49	61	55	52	56	48	60	55	62	57	49	61	55	52
54	50	57	52	60	59	62	49	57	53	54	50	57	52	60	59	62	49	57	53
49	54	52	61	49	55	51	57	62	54	49	54	52	61	49	55	51	57	62	54

Aufgabe 37 Die Auswertung einer Szene in einem verschneiten Gebirge gibt die folgende Verteilung von Helligkeitswerten. Wenden Sie eine lineare Kontrastdehnung (a) auf den vollständigen Datensatz an und (b) auf den Bereich der Helligkeitswerte, der mindestens 95% der Pixel umfasst.



Aufgabe 38 Konstruieren Sie für die folgende Verteilung von Helligkeitswerten eine Histogramm angegliche Kontrastanreicherung.



Anhang Formalia

8.1 Liste der verwendeten Symbole

β	Ausströmrage
γ	universelle Gravitationskonstante
δ	Vorwärtskompensation
ε	Exzentrizität
ε_λ	spektrales Emissionsvermögen
$\bar{\varepsilon}$	mittleres Emissionsvermögen
η	wahre Anomalie
η_k	Kommunikationswirkungsgrad
$\vec{\lambda}_c$	Laplace-Vektor
λ	Wellenlänge
μ	Gesamtmasse im Gravitationsgesetz
μ	Absorptionskoeffizient
Ω	Rektaszension
ω	Epoche
ϱ	Dichte
ϱ	Signal-Rausch-Verhältnis
σ	Stefan-Boltzmann Konstante
σ_c	Bahnkonstante
θ	Winkelauflösungsvermögen
a	große Halbachse
a_λ	spektrales Absorptionsvermögen
\vec{a}_s	Störbeschleunigung
A	Albedo
A	Fläche
A_{eff}	effektive Fläche
b	Bildweite
$b(p)$	Shannon-Funktion
B	Bandbreite
B	Bildgröße
$B_\lambda(T)$	Planck-Funktion
c_D	Widerstandsbeiwert
c_k	Konstante im 3. Kepler'schen Gesetz
C	Kanalkapazität
D	Öffnungsdurchmesser Objektiv
$D(u, v)$	Abstand (im Frequenzbereich)

D_0	Cutoff-Frequenz (als Abstand im Frequenzbereich)
d	Bildverschiebung
d	Hamming-Distanz
e_f	Effizienz eines Codes
E_b	Bitenergie
E_{kin}	kinetische Energie
f	Brennweite
f_e	Zahl erkennbarer Binärzeichenfehler
F	Informationsfluss
\vec{F}	Kraft
\vec{F}_{Reib}	Reibungskraft
F_B	Blickfeld
g	Gravitationsbeschleunigung
g	Gegenstandweite
G	Gegenstandsgröße
G	Antennengewinn
h	(Flug)Höhe
h	Planck'sches Wirkungsquantum
h_c	Energiekonstante
H	Übertragungsfunktion
H	Entropie
H_0	maximale Entropie
i	Inklination
I	Intensität
I	Informationsgehalt
k	Kantenlänge Film
L	Raumdämpfung
m	Masse
m	mittlerer Mehraufwand pro Zeichen
m_0	Startmasse
m_B	Masse bei Brennschluss
m_N	Masse der Nutzlast
m_T	Masse des Treibstoffs
M_E	Masse der Erde
M_M	Masse des Mondes
M_P	Masse des Planeten
M_{\odot}	Masse der Sonne
M_Z	Masse des Zentralkörpers
p	Bahnparameter
p	Wahrscheinlichkeit
\vec{p}	Impuls
P	Umlaufperiode
P_N	Leistung des Rauschens
P_S	Leistung des Signals
q	Strahlungsstrom
\vec{r}	Ortsvektor
\vec{r}_{MM}	Ortsvektor zum Massenmittelpunkt
r	relative Redundanz
r_v	Rauschverhältnis (signal to noise ratio)
R	Redundanz
R	Reichweite (Range)
R_b	Bitrate
R_b	Bodenaufklärungsvermögen
R_E	Erdradius

R_M	Radius des Mondes
R_\odot	Radius der Sonne
$r_{\odot,E}$	Abstand Sonne–Erde (astronomische Einheit AE, astronomical unit AU, 149 Mio km)
r_{EM}	Abstand Erde–Mond
S_λ	Ergiebigkeit
S_\odot	Solarkonstante
T	Umlaufzeit
T	Temperatur
T_b	Bitzeit
T_{eff}	Effektivtemperatur
T_R	Temperatur des Empfängers
T_S	Temperatur Ziel bzw. Bodenoberfläche
t	Zeit
t	maximale Korrekturfähigkeit eines Codes
u	Koordinate (Parameter, Frequenzbereich)
v, \vec{v}	Geschwindigkeit
v	Koordinate (Parameter, Frequenzbereich)
$) v_A$	Geschwindigkeit im Apozentrum
v_B	Geschwindigkeit bei Brennschluss
v_P	Geschwindigkeit im Perizentrum
v_k	Kreisbahngeschwindigkeit

8.2 Nützliche Konstanten

γ	$6.67259 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2/\text{kg}^2$	universelle Gravitationskonstante
σ	$5.67051 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$	Stefan–Boltzmann-Konstante
c	$2.99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s}$	Vakuum-Lichtgeschwindigkeit
e	$1.60217733 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	Elementarladung
h	$6.6260755 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$	Plank'sches Wirkungsquantum
k	$1.3806504 \cdot 10^{-23}$	Boltzmann Konstante
M_E	$5.9742 \cdot 10^{24} \text{ kg}$	Masse der Erde
M_M	$7.3483 \cdot 10^{22} \text{ kg}$	Masse des Mondes
M_\odot	$1.9891 \cdot 10^{30} \text{ kg}$	Masse der Sonne
R_E	6370 km	Erdradius
R_M	1740 km	Radius des Mondes
R_\odot	697 000 km	Radius der Sonne
$r_{\odot,E}$	$1.49 \cdot 10^6 \text{ km}$	Abstand Sonne–Erde (astronomische Einheit AU)
r_{EM}	384 400 km	Abstand Erde–Mond
S_\odot		Solarkonstante

8.3 Abkürzungen

AATSR	Advanced Along Track Scanning Radiometer
ACE	Advanced Composition Explorer
ADEOS	Advanced Earth Observing Satellite
AEM	Applications Explorer Mission
ARGOS	Advanced Research and Global Observation Satellite
AIRS	Atmospheric Infrared Sounder
ALT	Altimeter
AMSR	Advanced Microwave Scanning Radiometer
AMSR-E	Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS
AMSU	Advanced Microwave Sounding Unit
ASAR	Advanced SAR

ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection
ATLID	Atmospheric Lidar
ATN	
ATS	Application Technology Satellite
AVCS	Advanced Vidicon Camera System
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
BUV	Backscattered UV
CALIOP	Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization
CalTech	California Institute of technology
CAWSES	Climate And Weather in the Sun–Earth System
CCD	Charge Coupled device
CCRS	Canadian center for Remote Sensing
CEOS	Committee on Earth Observation Satellites
CERES	Clouds and the Earth’s Radiant Energy System
CGRO	Compton Gamma Ray Observatory
CHAMP	Challenging Minisatellite Payload
CIRES	Cooperative Institute for Research in Environmental Science
CPR	Cloud Profiling Radar
CME	Coronal Mass Ejection
CMIS	Conical-scanning Microwave Imager/Sounder
CNES	
CSA	Canadian Space Agency
CZCS	Coastal Zone Color Scanner
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DMC	Disaster Management Configuration
DMSP	Defense Meteorological Satellite Program
DoD	Department of Defense
EADS	European Aeronautic Defence and Space Company
EnviSat	Environmental Satellite
EOS	Earth Observing System
ERBE	Earth Radiation Budget Experiment
EROS	Earth Resources Observation Systems
ERS	Earth Resource Satellite
ERSDAC	Earth Remote Sensing Data Analysis Center
ERTS	Earth Resources Technology Satellite
ESA	European Space Agency
ESMR	Electrically Scanning Microwave Radiometer
ESP	Energetic Storm Particle
ESSA	Environmental Science and Services Administration
ETM	Enhanced Thematic Mapper
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus
EUV	Extreme Ultra Violet
FAPAR	Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation
FAS	Federation of American Scientists
FCKW	Flourchlorkohlenwasserstoffe
FPR	Flat Plate Radiometer
GCR	Galactic Cosmic Rays
GEMS	Global Monitoring for Environment and Security
GEOS	Geostationary Satellite
GERB	Geostationary Earth Radiation Budget
GES DISC	Goddard Earth Sciences – Data and Information Service Center
GIF	Graphics Interchange Format
GLONASS	Global Orbiting and Navigation Satellite System
GLAS	Geoscience Laser Altimeter System

GLRS	Geoscience Laser Ranging System
GMES	Global Monitoring for Environment and Security
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite
GOME	Global Ozone Monitoring Experiment
GOMOS	Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars
GPS	Global Positioning System
GRO	Gamma Ray Observatory
GSFC	Goddard Space Flight Center
HALOE	Halogen Occultation Experiment
HAO	High Altitude Observatory
HCCM	Heat Capacity Mapping Mission
HIRDLS	High Resolution Dynamic Limb Sounder
HIRIS	High-Resolution Imaging Spectrometer
HRIS	High-Resolution Imaging Spectrometer
HRMSI	High Resolution MultiSpectral Imager
HRV	High Resolution Visible
HSB	Humidity Sounder for Brazil
HST	Hubble Space Telescope
ICESat	Ice Cloud and Elevation Satellite
IFOV	Instantaneous Field of View
IMP	Interplanetary Monitoring Platform
IR	Infrarot
ISEE	International Sun Earth Explorer
ISRO	Indian Space Research Organization
ISS	International Space Station
ITIR	Intermediate and Thermal Infrared Radiometer
ITOS	Improved TIROS Operational System
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
JPEG	Joint Photographic Experts Group
JPL	Jet propulsion Laboratory
LAGEOS	Laser Geodetic Satellite
LandSat	Land (Remote Sensing) Satellite
LAWS	Laser Atmospheric Wind Sounder
LRR	Laser Retro-Reflector
MAPS	Measurement of Air Pollution from Satellites
MERIS	Medium Resolution Imaging Spectrometer
MeteoSat	Meteorological Satellite
MIPAS	Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding
MIR	(auch als das Wort Friede zu lesen)
MISR	Multi-angle Imaging Spectro-Radiometer
MLS	Microwave Limb Sounder
MODIS	Moderate-Resolution Imaging Spectrometer
MOMS	Modularer Optoelektronischer MultispektralScanner
MOPITT	Measurements of Pollution in the Troposphere
MSG	MeteoSat Second Generation
MSR	Multispectral Radiometer
MSRS	Multi-Spectral High Resolution System
MSS	Multi-Spectral Scanner
MWR	Microwave Radiometer
MVIR	Meteosat Visible and Infrared Radiometer
NavStar	NAVigations System with Time And Ranging
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NASDA	National Space Development Agency of Japan
NDVI	normalized difference vegetation index

NEMS	Nimbus-E Microwave Spectrometer
NLC	Nocti-Lucent Cloud
NOAA	National Oceanographic and Atmospheric Administration
NPOESS	National Polar-Orbiting Operational Environmental System
NPP	NPOESS Preparatory Project
NRL	Naval Research Lab
NSIDC	National Snow and Ice Data Center
NSSDC	National Space Science Data Center
OCO	Orbiting carbon Observatory
OMI	Ozone Monitoring Instrument
PNG	Portable Network Graphics
POAM	Polar Ozone and Aerosol Measurement
POES	Polar-orbiting Operational Environmental Satellite
PPP	Public-Private Partnership
RA-2	Radar-Altimeter-2
RGB	Red-Green-Blue
RBV	Return Beam Vidicon
RST	Remote Sensing Tutorial (der NASA)
SAA	Südatlantische Anomalie
SAGE	Stratospheric Aerosol and Gas Experiment
SAR	Synthetic Aperture Radar
SAM	Stratospheric Aerosol Measurement
SBUV	Solar Backscattered UltraViolett
SCIAMACHY	Scanning Imaging Absorption Spectrometer for atmospheric Cartography
SeaSat	Sea (Remote Sensing) Satellite
SEM	Space Environment Monitor
SEP	Solar Energetic Particle
SEVIRIO	Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager
SMM	Solar Maximum Mission
SMMR	Scanning Multichannel Microwave Radiometer
SOHO	Solar and Heliospheric Observatory
SPM	Solar Proton Monitor
SPOT	System pour l'Observation de la Terre
SR	Scanning Radiometer
SSC	Swedish Space Corporation
SST	Sea Surface Temperature
STSI	Space Telescope Science Institute
SWAMI	Short-Wave Aerostat mounted Imager
SWH	significant wave height
TDRS	Tracking and Data Relay System
TES	Tropospheric Emission Spectrometer
THIR	Temperature Humidity Infrared Radiometer
TIR	thermal infrared, thermisches Infrarot
TIROS	Television Infrared Observation Satellite
TM	Thematic Mapper
TOMS	Total Ozon Mapping Spectrometer
TOS	TIROS Operational Satellite
TRACER	Tropospheric Radiometer for Atmospheric Chemistry and Environmental Research
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission
TVOS	TIROS Operational Vertical Sounder
UCS	Union of Concerned Scientists
USGS	US Geological Survey
USRA	University Space Research Association
UVSP	Ultraviolet Spectrometer and Polarimeter

VEEGA	Venus–Earth–Earth–Gravity–Assist
VHRR	Very High Resolution Radiometer
VIRS	Visible and Infrared Spectrometer
VIS	visible
VISSR	Visible and Infrared Spin Scan Radiometer
WFC	Wide Field Camera
WMAP	Wilkinson Microwave Anisotropy Probe WMAP

Kapitel 9

Etwas zum Spielen

9.1 Lempel–Ziv-Algorithmus

§ 1180 Wir haben in § 1015 den Lempel–Ziv-Algorithmus eingeführt, der einen von der Statistik der Datenquelle abhängige Codierung erlaubt. Da das Beispiel in § 1017 nicht besonders beeindruckend war, betrachten wir hier ein etwas längeres Beispiel. Mit Hilfe eines Zufallsgenerators wurde die folgende, aus 10 000 Bit bestehende Sequenz erzeugt:

```
011110111101001110111010100110011001101101111010100001011010100100000010001100011011
01111011011101011100001100110010000010001001111000110110000100010001011000001111
0010101111011101011110011010011011011001110011100000110110111001011111111000000
01101111000111000011101100000001011011000000101101101000110010100101100011001111
10100101110001001000011011101100011101110010100010101111101011100000110000101101
00111100011011010000111010010010111001110001101010100111001001110110110010101010
00110101011010100111110111000011000010010100001100000101110010011101011101000011
1111110000010011101011100011011111000100111110011110110011110001100011011001111
100100110100001010100000101010100010111111001101000111101111110000111000111000
00111000000111100011000100101000011111000111001001001111010011100000010011010011
01001001100011011000101001001110101000011000011001111001101110001001011100011010
00100111110110100000010100011100101000010000100010000111010100011001011001000101
10000101011100000110111100000001001111011010010101100010001001100000011001101100
10011101001011110110101001000111111011000001101100001011101111010101010101000110
10011011101011011010101010000100100100010111100111010101010111110011010001001100
0001010111111001010011011101001001110001100001010000110011001111110010010110011
0100110000000101111110010111101001110011001111000001000101110101011111110010111
1101111100001110100010000001111110101011101110110100011111000101110010101100101
11110111110010000100110000101010101010100101110011101110011101000100011110011100
01100010110100111101100011110011010100101011000111101110001110000100000110110010
11101001010111010011011001011110011000101001111110000100011010111111000101101101
11111011011011011000101110000100111111001101001110000111101000001000110010011010
10011101110101111000001110100110110010100100011011010101100001101010011011010000
01000110110000100101000110011111110011110110101101100111100111110010000000101100
100100110001001111110010011101100010110010001111111010100101000001011011101010010
11000011100101010100000111010110100011100110100000000110010001010001110001011100
01001001010100100001101100001100100100110000111011101000100000001100110110111000
00101101001110100000110101100100100011101011000010111110011110110010000101110100
00001100110001111101001011011101110100111010010011111011101110001100001011110
00110001010111110011100111110001000010101111111000110011111010010001001101111100
01100000100100011111101000100110101001100110100001001010000101010001101111111010
```

11100001111001110010001000000011001110001001010010111001111101100100010011011111
00101111010111010100100111001000000111011100111001110000010100101111111010100
001100000011001010100111011010010011011011001111001100011001101000010000001100
00010100010011110101001010011110110101101101101010001010000010000110100011000
11000001100001001000010101011101001110100110011010000010001110100001010100010010
01011111001111100100110101110001101010100111000110001001011110111010001101000000
011001110011101001111101111010000001011000001001111011111110111100110001011001
01100000001001001100001010011101010000001010111010001101110101100011010101101
0111111110000010010100001010011001101011111101011011001001010100101011010010100
1001010110100000100110110110000001110101010010001100011010110000110011101001100
010101111101000001001001000000010101010001010110101001000001100011111110001101
000011000111010011101011010101011000000011010110101111110010001010111010000100
010011101000101100110011011111110100000101101110011011111011001100111100101101
0110111001001011001111010010010110001101011100111000011001101110110011101011111
11110011011101011110001010100011010010111100001001111001101100011000110111010110
10010111000101101010001010101000011110111001101100101101101100111010001111101110
01011011000010100011101011101101010111010011100000110001011011011010010101101110
0110010100000110011110010000111011110010010101000011100101010101000010101000110
000010110111111110111110010110000000100100010101110001101001011010010101010000
0010010100011111000011100100010010001101101000001101110101011001101010011010000
10001010010010101111010111110001010011110111101000100110111111001000100001101001
0000101111100111100101000100000101011101010001010111110011100101000101110100101
01101011000111011001110100101100010111101011100100010110101101100000001001110110
01101100100011101100000101001010111011010001100010111011001100001110011110000011
100100011011000100111011111000001010001101010111001000111110001010000000010000
11010100000001010011100111001001100001101110100001010100111101000000101101011000
1001100001100111111100101110111010111010110011100000100011011111111110010
1110100010001111110110010100110011001001100011011101100110101001110111100011010
10010011110010111000111001100011010100101100011111011010111111000010100110101101
11111001000110111101000011010010011101101101011110111011101010111001110111111000
01001000111000101000110011001110011011110010000111100101010111000111110011011001
10110010110010001011100010000001010100000011010110101111100001110010110000011011
01011101000111001101100100011100000010101110001101101110110000110101011101000001
01100011111100111111010101000101111110110111110100110111100001010110100000011000
11111110110011111001010011010100110010011010100010111100001110111001111101100001
0000000100010110010111101001111101101001111010100010100001110011101011011001101
0110010100111010000110000111110100111011110111110110000010011000011110111011100
10100100011010110011011000100111100000100001100000011011110110101110101110111000
00010111000000000101101001110010000111100010110001100111101000100110000010010110
00101110011010001110010111010010100111001100101101111000101001101101000010001111
1010101101111100101010000101010001011000101110101001111011011011110010100100100
1100001010100001100000100101000110000100011111101000000101010100011111011001010
0011001101001110101010101001100011111011011100000001110111000001110101001011000
0010001110100101010010010111111010111111001100111001001010100010101100100101101
00100101011111000000010100001111100100010101010010101111001011011001110111111101
11000101100010000101010111101101011000010011111110101000101101111000100010010110
1100100110101001000110010111011110000000100010000011100010100100100111110011100
1000111010110101111111100110111001000000110011101001011011100110101110110111011
01000000100101101011000110110111100010100000110111000001100000111101101000110110
10010000101000001101100110010111110110011000010000000010100110101010000010111100
10100111001110100101011000011010001111011101011000000010110000010010111000000110
11111110100011001001011001101111100101000000100011000111111100101100111100011101
000110001111111100110100010000011001010010101110101110100000110101111101010010
0001000110000101010110001111101001100111001001010100010101100100101100100101101
00100101011111000000010100001111100100010101010010101111001011011001110111111101
11000101100010000101010111101101011000010011111110101000101101111000100010010110
1100100110101001000110010111011110000000100010000011100010100100100111110011100
1000111010110101111111100110111001000000110011101001011011100110101110110111011
01000000100101101011000110110111100010100000110111000001100000111101101000110110
10010000101000001101100110010111110110011000010000000010100110101010000010111100
10100111001110100101011000011010001111011101011000000010110000010010111000000110
11111110100011001001011001101111100101000000100011000111111100101100111100011101
000110001111111100110100010000011001010010101110101110100000110101111101010010
000100011000010101011000111110100110011100100100101011100101101100111100011101

```

00010000110011110110001001001000110010101010100010011001111010010111001100110011
01111110111111000110001100011000000011111001111001000111100111010001010111001110
01011101101001111011001111011000101011001111110111011011001001111000000100100
0011100111001101101000001010001110111011100111100010100001011010100000010010101
00100010010000111001000100101101000110111001010010101011101100100010001100011001
0101101110111001001100100101011100111111011111010100110010101000100001010000010
01110011000111101100011100101110011111011111001010110100001011010110010110010010
10001011111110010001010110011000011100110010101101001000010110001001001110110100
00111010011101000110101010110100111110001110110100000011011000110011000110011110
11000010000111100100110010100001110101010001101111110110110111000000111101001011
00011010111001001010001111010101100000100100101001011101110011000101110000011101
1001101000111101111000011000000111111010101101000111101111000010100110111111111
10001101111111011100100010011011101000000011000000011011000000000111100000010
0011010010110110111100010000110111000101101110001001100110011110001111100000010
11010110101010000011100110100011111000111100101011110001011001000110010110001110
00111110101011000000100111010000111100111010010110110001000011011011101000001110
1010110001010001100101111111010101011011010100011000100110100111100111010010100
01000110000111100100111110111000100110100001011011110000111001100110011000010000
11111010111010110110110110101010001000101110110110001111101001101011010110110010
010010010111000101100011011111001000100001111111110110101000011111000011111101
0000111010011111110010101101011011000000111110111000000100110010111010000100010
1000110011101111110011101111100100010101000001101010111011001010101100010101101
00001000100110011100111000010100010100001011001001111000011010001110101101111001
111010101001101101001100101101100111100001111110111111100110110100000010101010
11010000100110101010010100000010010001010110011110110011000000010110111000010000
10000111001111110010101100111011100110011111100010100000101011001010000010111000
10011110001011110110100011100011010001010100000010011011010010111000100111010111
0111100110010010010011100000111111111101011011010010011110010010010010101110001
01101000010001000001101110101000010111101010111001000100100001101001100011111101
10010101111001111011000111101011001101011110111011101111000010101001011100011011
1001011101011010001111100101010111100101001000000111101100011010111111100000011
00001100101100101110101100010010001001000101011110101111001110110011111010100101
01000101011000011101111011110100000110100011100011011110110100010110111001011011
11100001111000001011000100011110001100111010101010110110101001111000001011111101
1111110111100101101001001110011111110011000000101101001101001011100110111000001
00001110111110100000111101111010000001110001110011110011000000111000010100
00010001110001010000011101110110010100101100011110011010101101011111000001011011
10010111110101110011101100010111110010101000011110000101101000101011001110010011
00000011001000100010010101110010001010010100100100111101011111011110011100011
10110001110110110010110100010110110101100010001

```

§ 1181 Für die Lempel–Ziv Codierung müssen wir diese Sequenz wieder in Phrasen aufbrechen und über letztere in Anlehnung an Tabelle 6.5 genau Buch führen. Ersteres ist für die ersten Zeichen durch die Farbcodierung bereits vorgenommen, letzteres können Sie, zumindest für einen Teil der Sequenz, in Tabelle 9.1 und 9.2 eintragen.

§ 1182 Spielen Sie mit weiteren Zeilen aus dem Beispiel und entwickeln Sie ein Gefühl dafür, wie die Phrasen wachsen – und wie der Text damit im Gegensatz zu dem kurzen Fragment in § 1017 effizienter zu kodieren ist.

9.2 Bilder in MATLAB

§ 1183 Die Beispiele zur Bildbearbeitung in diesem Skript sind alle mit MATLAB erstellt. Zwar hätte uns die Arbeit auch jedes konventionelle Bildbearbeitungssystem abnehmen

#	Phrase	Code	#	Phrase	Code	#	Phrase	Code
1	0		51			101		
2	1		52			102		
3	11		53			103		
4	10		54			104		
5	111		55			105		
6	101		56			106		
7	00		57			107		
8	1110		58			108		
9	11101		59			109		
10	01		60			110		
11	001		61			111		
12	100		62			112		
13	110		63			113		
14	1101		64			114		
15			65			115		
16			66			116		
17			67			117		
18			68			118		
19			69			119		
20			70			120		
21			71			121		
22			72			122		
23			73			123		
24			74			124		
25			75			125		
26			76			126		
27			77			127		
28			78			128		
29			79			129		
30			80			130		
31			81			131		
32			82			132		
33			83			133		
34			84			134		
35			85			135		
36			86			136		
37			87			137		
38			88			138		
39			89			139		
40			90			140		
41			91			141		
42			92			142		
43			93			143		
44			94			144		
45			95			145		
46			96			146		
47			97			147		
48			98			148		
49			99			149		
50			100			150		

Tabelle 9.1:

Phrase	auftreten	Phrase	auftreten	Phrase	auftreten	Phrase	auftreten
0	1	1	2	000000		100000	
00	7	10	4	000001		100001	
01		11	3	000010		100010	
000		100		000011		100011	
001		101	6	0000100		1000100	
010		110		0000101		1000101	
011		111	5	0000110		1000110	
0000		1000		0000111		1000111	
0001		1001		0001000		1001000	
0010		1010		0001001		1001001	
0011		1011		0001010		1001010	
0100		1100		0001011		1001011	
0101		1101		0001100		1001100	
0110		1110	8	0001101		1001101	
0111		1111		0001110		1001110	
00000		11111		0001111		1001111	
00001		10001		0010000		1010000	
00010		10010		0010001		1010001	
00011		10011		0010010		1010010	
00100		10100		0010011		1010011	
00101		10101		0010100		1010100	
00110		10110		0010101		1010101	
00111		10111		0010110		1010110	
01000		11000		0010111		1010111	
01001		11001		0011000		1011000	
01010		11010		0011001		1011001	
01011		11011		0011010		1011010	
01100		11100		0011011		1011011	
01101		11101	9	0011100		1011100	
01110		11110		0011101		1011101	
01111		11111		0011110		1011110	
000000		100000		0011111		1011111	
000001		100001		0100000		1100000	
000010		100010		0100001		1100001	
000011		100011		0100010		1100010	
000100		100100		0100011		1100011	
000101		100101		0100100		1100100	
000110		100110		0100101		1100101	
000111		100111		0100110		1100110	
001000		101000		0100111		1100111	
001001		101001		0101000		1101000	
001010		101010		0101001		1101001	
001011		101011		0101010		1101010	
001100		101100		0101011		1101011	
001101		101101		0101100		1101100	
001110		101110		0101101		1101101	
001111		101111		0101110		1101110	
010000		111111		0101111		1101111	
010001		110001		0110000		1110000	
010010		110010		0110001		1110001	
010011		110011		0110010		1110010	
010100		110100		0110011		1110011	
010101		110101		0110100		1110100	
010110		110110		0110101		1110101	
010111		110111		0110110		1110110	
011000		111000		0110111		1110111	
011001		111001		0111000		1111000	
011010		111010		0111001		1111001	
011011		111011		0111010		1111010	
011100		111100		0111011		1111011	
011101		111101		0111100		1111100	
011110		111110		0111101		1111101	
011111		111111		0111110		1111110	

2. Juli 2008

© M.-B. Kallenrode

Tabelle 9.2: Erstes Auftreten einer Phrase ...

können; allerdings macht ein solches Programm meistens etwas ohne das wir wirklich wissen, was es macht. Die Bildbearbeitung in MATLAB erlaubt es uns, den Prozess mit Hilfe eines uns bekannten Algorithmus zu steuern und nicht nur nach dem Kriterium, ob das Ergebnis gefällt. Fall Sie nicht mit MATLAB sondern einem vorgefertigten Programmpaket mit sehr vielen und teilweise sehr speziellen Fähigkeiten spielen möchten, empfehle ich [180].

§ 1184 Ausgangspunkt ist ein digitales Bild in der Datei *inpic*. Die Endung der Datei sollte zweckmäßigerweise die Information über das Format enthalten; MATLAB akzeptiert u.a. die folgenden Eingabeformate: BMP (Microsoft Windows Bitmap), GIF (Graphics Interchange Files), HDF (Hierarchical Data Format), JPEG (Joint Photographic Experts Group), PCX (Paintbrush), PNG (Portable Network Graphics), TIFF (Tagged Image File Format) und XWD (X Window Dump). Mit Hilfe des Befehls

```
>> [PIG] = imread('inpic','gif');
```

oder in verkürzter Form

```
>> [PIG] = imread('inpic.gif');
```

wird die Bildinformation des GIF-File *inpic.gif* der Variablen PIG zugewiesen. Bei einem nur aus Grauwerten bestehenden Bild ist PIG eine $n \times m$ -Matrix; bei einem RGB-Bild wird ein dreidimensionales Array mit der Dimension $n \times m \times 3$ erzeugt.¹

§ 1185 Im Regelfall, d.h. für die gängigen Bildformate, sind die Elemente von PIG 8-Bit Integer Werte (uint8, wie ein Blick in den Workspace zeigt). Die Einschränkung sollten wir bei allen Bearbeitungen der Datei im Hinterkopf behalten: Filterungen und Mittelwertbildungen sind in einem anderen Zahlenraum meist praktischer!

9.2.1 Kombination von Spektralkanälen

§ 1186 Verwenden wir Abb. 3.48 und 3.49 als Beispiel. Die Bilder in Abb. 3.48 können von [398] herunter geladen werden. Sie enthalten jeweils die Grauwerte für einen einzelnen Kanal. Lesen wir sie mit

```
>> [P1] = imread('band1.jpg');
```

ein, so wird jeder Kanal in ein 850×1100 uint8 Array geschrieben.

§ 1187 Zur Kombination verschiedener Kanäle müssen wir die entsprechende Arrays zusammenfügen. Dazu stellt MATLAB mit Concatenate *cat* eine geeignete Funktion zur Verfügung. Die Reihenfolge der Arrays ist dabei derart, dass entsprechend dem RGB-Schema der erste Kanal in Rot, der zweite in Grün und der Dritte in blau dargestellt wird. Die Befehlssequenz für das im linken Teil von Abb. 3.49 gezeigte Bild in echten Farben ist dann

```
>> kombi321 = cat(3,P3,P2,P1);
```

§ 1188 Zur schnellen Überprüfung können wir uns das Bild ansehen mit

```
>> image(kombi321);
```

Für die spätere Weiterverarbeitung lässt sich das Bild z.B. mit

```
>> imwrite(kombi321,'outpic.png','png')
```

in die PNG-Datei *outpic.png* schreiben.

§ 1189 Bis Sie alle 3er Kombinationen aus den sieben Kanälen ausprobiert haben, sind sie wahrscheinlich einige Zeit beschäftigt. Abbildung 9.1 zeigt einige der Kombinationsmöglichkeiten.

¹Bei speziellen Codierungen im CYKM Schema entsteht ein $n \times m \times 4$ Array – MATLAB erkennt dies jedoch aus der Dateistruktur, als Nutzer müssen wir das nicht separat spezifizieren. Ein Blick in den Workspace zeigt, welche Struktur die Variable PIG hat.

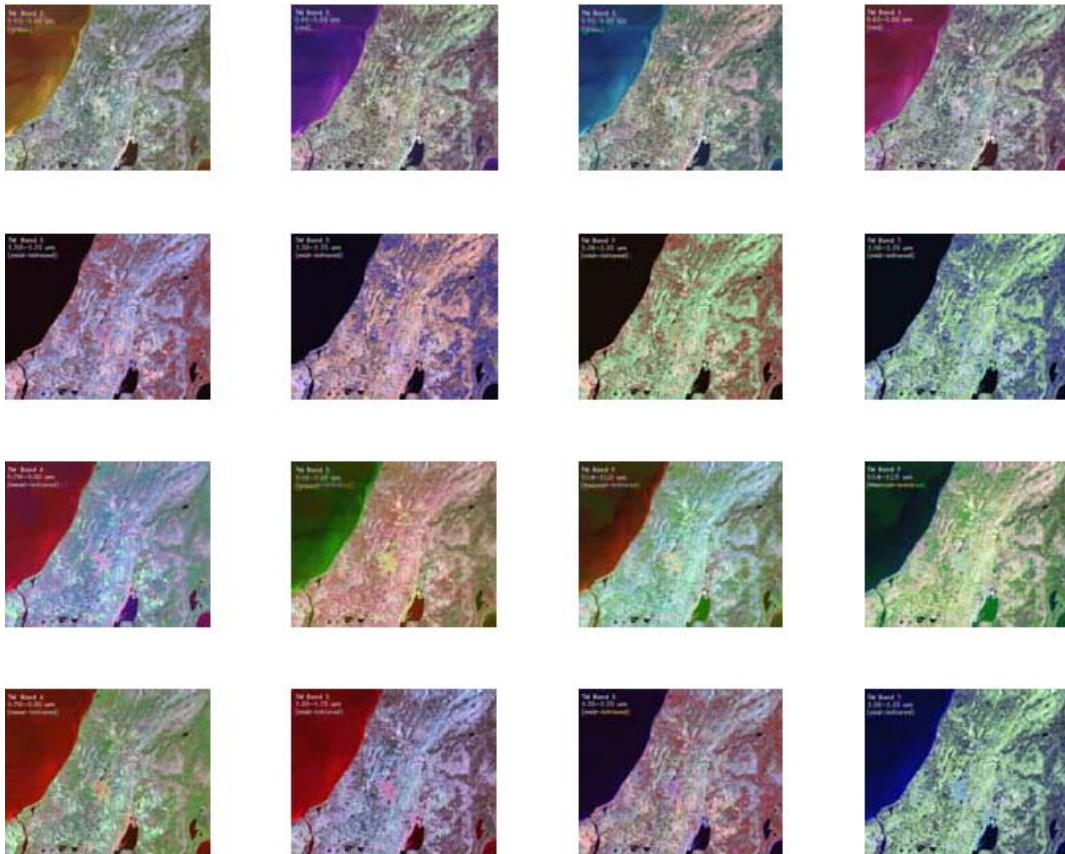
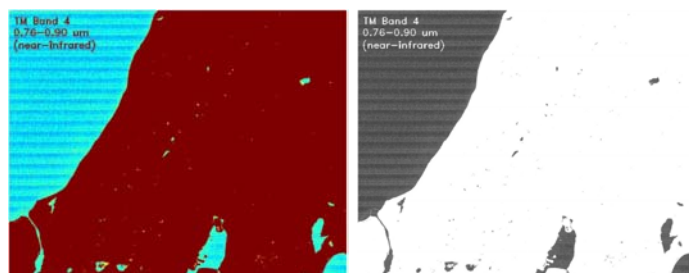


Abbildung 9.1: Kombinationen der Kanäle aus Abb. 3.48; oben jeweils 3 Kanäle sichtbar, zweite Reihe jeweils drei Kanäle nahes IR, dritte Reihe jeweils ein sichtbar, ein nahes IR sowie der thermisches IR, untere Reihe jeweils zwei nahes IR und ein sichtbar

§ 1190 Die Anwendung des Befehls `image` auf einen einzelnen Spektralkanal liefert, wie in Abb. 9.2 angedeutet, nicht ganz das gewünschte Resultat: `image` erzeugt seine Bild derart, dass jedes Element einer Matrix direkt als der Index in die Colormap der Abbildung interpretiert wird oder eben als RGB-Wert. Der erste Fall wird auf ein eindimensionales Array angewendet, der zweite auf ein dreidimensionales. Da die Helligkeitswerte eines einzelnen Spektralbandes nur ein eindimensionales Array füllen, wird auf eine Colormap abgebildet. Auch die Wahl der Colormap 'Gray' liefert, wie im linken Teil von Abb. 9.2 zu erkennen, nicht das gewünschte Resultat.

§ 1191 Eine einfache (allerdings Platz-intensive) Lösung besteht darin, mit `Concatenate` `cat` einfach alle drei RGB-Kanäle mit den gleichen Helligkeitswerten zu füllen:

Abbildung 9.2: Der Befehl `image` angewendet auf ein $n \times m$ -Array, in diesem Fall die Helligkeitswerte von Band 4. Auch die Verwendung der Colormap `gray` (*rechts*) löst das problem nicht



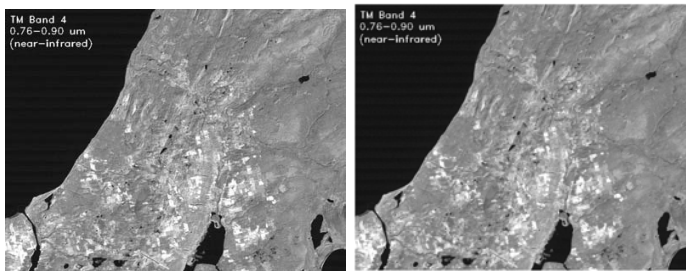


Abbildung 9.3: (*Links:*) Original der Helligkeitswerte von band 4; (*rechts:*) mit `cat` und `image` erzeugtes RGB-Bild in S/W

```
>> P4rgb = cat(3,P4,P4,P4);
```

Das Resultat ist im rechten Teil von Abb. 9.3 gegeben; der linke Teil zeigt zum Vergleich das 'Original'.

9.2.2 Zerfleddern kombinierter Kanäle

§ 1192 Beim Spiel mit normalen Photos, wie z.B. in Abb. 3.23 und 3.24, ist der Ausgang bereits ein Farbphoto – das Helligkeitsmuster liegt in drei Kanälen vor. Daher müssen wir vor einer weiteren Bearbeitung die Kanäle trennen. Als erstes schreiben wir `inpig.jpg` wieder in die Variable `PIG` und holen uns aus dem Workspace die Information über das Format. Nehmen wir `kombi321` als Beispiel und lesen mit `imread` ein, so ist `PIG` ein dreidimensionales Array mit dem Format $850 \times 1100 \times 3$.

§ 1193 Aus diesem Array lassen sich die einzelnen Kanäle extrahieren; in einer vielleicht etwas aufwendigen expliziten Form (alternativ mit For-Schleife und Index) als

```
>> KRED(:, :) = kombi321(:, :, 1); ←
>> KGREEN(:, :) = kombi321(:, :, 2); ←
>> KBLUE(:, :) = kombi321(:, :, 3); ←
```

Damit sollten wir wieder die Ausgangskanäle erhalten haben: die Differenz `KRED-P3` sollte also verschwinden. Davon können wir uns z.B. mit der Sequenz

```
>> maximum = max(max(diff(KRED-P3)))
```

überzeugen.

9.2.3 Histogramme

§ 1194 Histogramme erstellt MATLAB mit Hilfe des Befehls `hist` automatisch. Allerdings sollten wir `hist` nicht auf ein Bild in voller Schönheit anwenden: MATLAB verlangt als Eingabe für `hist` einen Vektor oder eine Matrix; ein dreidimensionales Array ist nicht vorgesehen. Allerdings interessieren die Histogramme auch nur für einzelne Kanäle, d.h. die Eingangsgröße in `hist` ist eine Matrix.

§ 1195 Auf eine Matrix angewendet liefert `hist` für jede Spalte der Matrix ein Histogramm. Um das Histogramm aller Helligkeitswerte der Matrix zu erhalten, formen wir diese mit `reshape` um:

```
>> LP1 = reshape(P1(:, :), [], 1);
```

Auf diese Weise wird aus der 850×1100 -Matrix ein 935000×1 Vektor erzeugt. Der Datentyp wird dabei nicht verändert, d.h. die Elemente des Vektors sind weiterhin vom Typ `uint8`.

§ 1196 Zum weiteren Rechnen ist `uint8` (ebenso wie auch `uint16`) aus zwei Gründen unpraktisch:

- MATLAB kann intern nicht jedes Format mit jedem anderen kombinieren. So lässt sich z.B. `hist` nicht auf `uint8`-Größen anwenden.

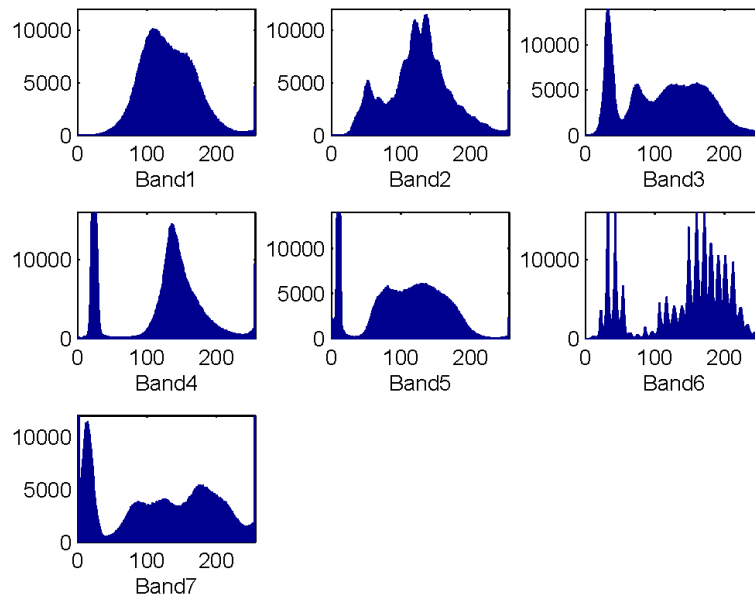


Abbildung 9.4:
Histogramme der
Bänder aus Abb. 3.48

- selbst bei einfachen arithmetischen Operationen bei der Glättung oder anderer Filterung ist uint8 unpraktisch, da der Zahlenraum zu klein ist.

Daher bietet sich die Konversion in den konventionellen Datentyp double an:

```
>> X64 = double(X8) + 1
```

Sollen die Daten nach der Bearbeitung wieder in ein Bild überführt werden, so muss die Conversion von double nach uint8 (oder entsprechend uint16) erfolgen gemäß

```
>> X8 = uint8(round(X64 - 1))
```

Wenn wir mit Hilfe von imwrite ein indiziertes Bild erzeugen, konvertiert MATLAB die Werte automatisch falls erforderlich.

§ 1197 Nach erfolgter Konversion lässt sich hist direkt anwenden. Die vollständige Sequenz zur Erstellung des Histogramms ist also

```
>> LP1=reshape(P1(:, :), [], 1); ←
>> LF1=double(LP1)+1; ←
>> hist(LF1,256) ←
>> axis([0 256 0 12000])
```

§ 1198 Die Histogramme der sieben Spektralbänder für die Szene aus Abb. 3.48 sind in Abb. 9.4 gegeben. Der Peak bei den niedrigen Helligkeitswerten in den Kanälen 3 und höher ist die Wasserfläche. Die Spikes im thermischen Infrarot sind kein numerisches Artefakt sondern scheinen reale Quellen unterschiedlicher Temperatur zu reflektieren. Die relativ schmale Verteilung der Helligkeitswerte im blauen Kanal Band 1 ist eine Folge der Dunststreuung.

9.2.4 Filtern

§ 1199 Zum Filtern empfiehlt es sich, mit den double statt den uint8 Daten zu arbeiten. Hier wird nur das Filtern von Hand mit dem Kernel wie im Haupttext demonstriert; die schnellere Verwendung einer Laplace-Transformation mit Hilfe des MATLAB-Befehls filter wird nicht berücksichtigt.

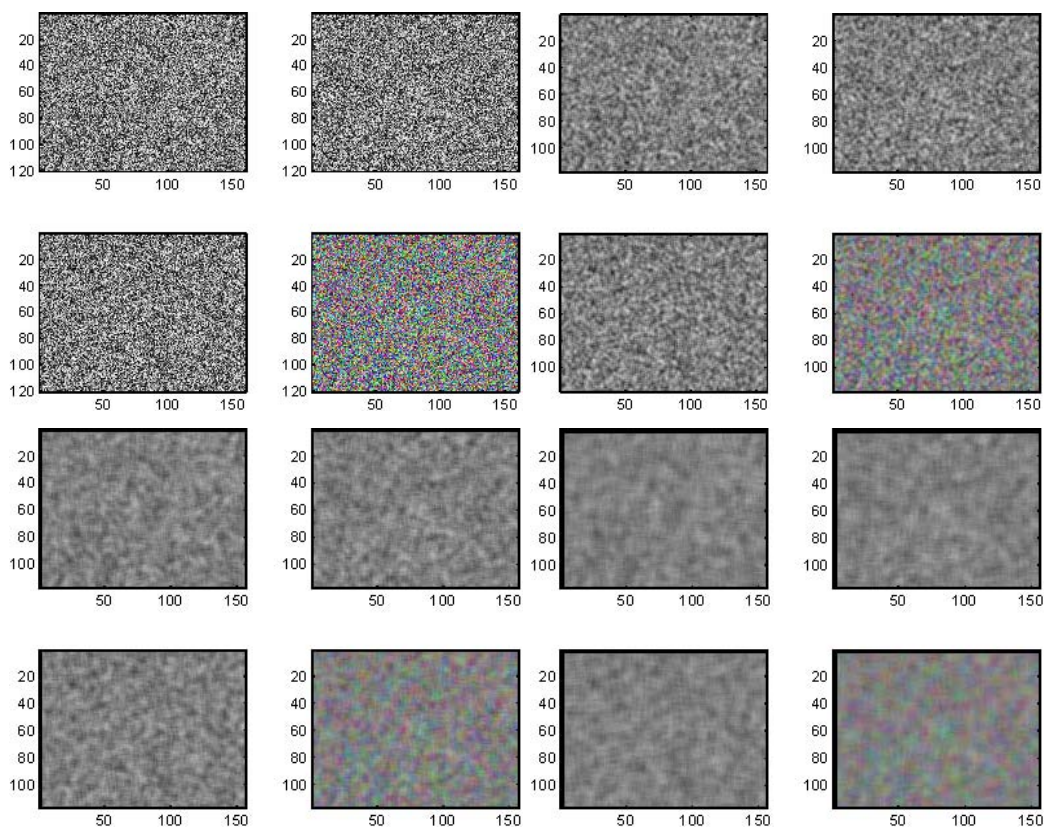


Abbildung 9.5: Glättungsfilter angewendet auf ein aus Zufallszahlen erzeugtes Bild. Die 2×2 -Unterbilder geben jeweils die Helligkeitswerte in rot, grün, blau und RGB wieder. Links oben die zufällig erzeugten Helligkeitswerte, rechts oben mit einem linearen 3-Filter geglättet, links unten mit einem linearen 5-Filter und rechts unten mit einem linearen 7×7 -Filter

§ 1200 Das Filtern von Hand bedeutet im wesentlichen, dass der Helligkeitswert $p_{i,j}$ in einer Zielzelle (i, j) mit Hilfe der Helligkeitswerte in benachbarten Zellen modifiziert werden soll. Da der entsprechende Algorithmus für alle Zellen durchgeführt werden muss, ist ein derartiger Filter in MATLAB stets mit zwei for-Schleifen verbunden.

§ 1201 Ein einfaches Glättungsfilter mit einem $(2n + 1) \times (2n + 1)$ -Kernel lässt sich eine $m1 \times m2$ -Matrix anwenden als

```
for ihor=n+1:m1-(n+1)
    for ivert=n+1:m2-(n+1)
        r3red(ivert,ihor)=(sum(rred(ivert-1,ihor-n:ihor+n))+
            sum(rred(ivert,ihor-n:ihor+n))+
            sum(rred(ivert+1,ihor-n:ihor+n)))/9;
    end
end
```

mit $n = 1$, entsprechend einem 3×3 -Kernel. Für größere Kernel lässt sich zwar die Summation in einer Richtung (in diesem Fall in der horizontalen) in der obigen Form beibehalten; für die vertikale Summation habe ich jedoch keine andere Darstellungsform als die hier gegebene explizite hin gekriegt – was aber für den Rechenaufwand unerheblich und nur für die Frage schöner Code oder nicht interessant ist.

§ 1202 Abbildung 9.5 zeigt die Wirkung eines solchen Glättungsfilters auf zufällige Daten. Die Original-Daten sind die vier Teilbilder in der linken oberen Ecke: für den roten, grünen

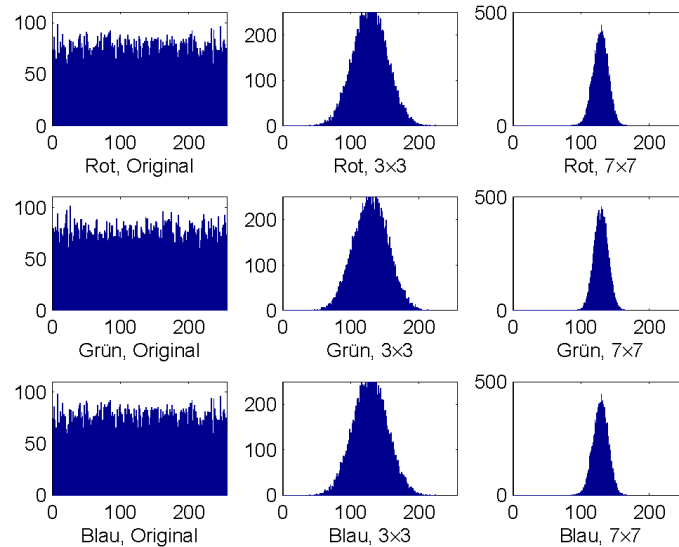


Abbildung 9.6: Histogramme der Einzelkanäle für die ungeglätteten (*links*) und die geglätteten (*Mitte und rechts*) Einzelkanäle aus Abb. 9.5

und blauen Kanal wurde eine Matrix mit Zufallszahlen erzeugt, die vierte Abbildung zeigt diese Matrizen zum RGB-Bild kombiniert. Wie von Zufallszahlen zu erwarten unterscheiden sich benachbarte Bildpunkte deutlich; das Bild wirkt in den Einzelkanälen körnig, im zusammengesetzten RGB-Bild treten zwar Farben aus dem gesamten Spektrum auf, aber auch hier fehlt der Zusammenhang zwischen den benachbarten Bildpunkten.

§ 1203 In den anderen Bildsätzen sind die Zufallsdaten jeweils mit einem linearen 3×3 , einem 5×5 und einem 7×7 -Filter geglättet, d.h. die Mittelung erfolgte über 9, 25 bzw. 49 Bildpunkte. Mit zunehmender Kernelgröße verringern sich die Differenzen benachbarter Bildpunkte, das Bild wirkt zunehmende verwaschener. Insbesondere im RGB-Bild bleibt im wesentlichen ein Grauschleier.

§ 1204 Das Verschwinden der Kontraste durch die Mittelung zeigt sich auch in den Histogrammen der zufälligen und der geglätteten Helligkeitswerte der einzelnen Kanäle, siehe Abb. 9.6. Da die Helligkeitswerte einer Zufallsverteilung entnommen sind (linke Spalte), sind sie in den einzelnen Kanälen annähernd gleich verteilt. Mit der Mittelung über 9 (mittlere Spalte) bzw. 49 (rechte Spalte) Bildpunkte wird diese Gleichverteilung immer weiter zugunsten des Mittelwerts 127 zusammen geschoben.

§ 1205 Die anderen in Kap. 7 diskutierten Filter lassen sich alle unter Verwendung der geeigneten Wichtungsfaktoren und Kernelgrößen entsprechend dem Beispiel in § 1201 aufbauen. Experimentieren Sie mit zufälligen Mustern oder normalen Bildern!

9.2.5 MATLAB und das Alphabet

§ 1206 Falls Sie, z.B. im Zusammenhang mit der Häufigkeit von Buchstaben in einem Text oder mit künstlichen Sprachen, mit Buchstaben in MATLAB spielen wollen, so müssen die Buchstaben in die Zahlenwerte der entsprechenden ASCII-Zeichen umgewandelt werden. Dazu zuerst den String in Double umwandeln:

```
mytext = 'Falls Sie, z.B. im Zusammenhang'; ←
mytext=double(mytext) ←
70 97 108 108 115 32 83 105 101 44 32 122 46 66 46 32 105 109 32 90 117 115 97
109 109 101 110 104 97 110 103
```

§ 1207 Der Rückweg, die Ausgabe von Zahlenwerte der ASCII-Zeichen als Buchstaben lässt sich mit Hilfe der Option %s im `sprintf`-Befehl erzeugen:


```
mvec = [77 65 84 76 65 66]; ←  
sprintf('%s ', mvec) ←  
ans =  
    MATLAB
```

Eine kürzere Variante bietet der Befehl `char`:

```
mvec = [77 65 84 76 65 66]; ←  
char(mvec) ←  
ans =  
    MATLAB
```

Abbildungsverzeichnis

1.1	Wüstenlandschaft des Fessan (Lybien)	6
1.2	Osnabrück vom Ikonos	6
1.3	Standardvorstellung von Erdfernerkundung	7
1.4	Ozonloch in Gesamtozonsäule (TOMS und GOME)	7
1.5	Militärischer Drachen	9
1.6	Manlifter	9
1.7	San Francisco 1906	10
1.8	Modell Sputnik 1	11
1.9	U2 Spionageflugzeug	11
1.10	EnviSat	12
1.11	Sicherheit als Produkt	14
1.12	Z.Z. aktive Satelliten nach Staat/Verwendung	14
1.13	Charakteristische Skalen	16
1.14	Waldbrände in Kalifornien	17
2.1	Kepler'sche Gesetze	23
2.2	Bewegung um den gemeinsamen Schwerpunkt	25
2.3	Kenngrößen einer elliptischen Bahn	29
2.4	Festlegung der Bahnparameter einer Satellitenbahn	32
2.5	Beispiele für Satellitenbahnen	32
2.6	LAGEOS 1	35
2.7	Tägliche Dichteveriation in der Hochatmosphäre	37
2.8	Luftwiderstand und Kosmos 1097	39
2.9	Änderung der Bahnparameter durch Luftwiderstand	39
2.10	SMM-Absturz	40
2.11	Bahnstörung in Folge der Abplattung der Erde	41
2.12	Präzession der Bahneben	42
2.13	Apsidendrehung	43
2.14	Bodenspur LandSat	46
2.15	... und wirft seinen Schatten voraus	46
2.16	Polare und sonnensynchrone Bahn	47
2.17	Beispiele für sonnensynchrone Bahnen mit Lokalzeit	47
2.18	Information im Schatten	48
2.19	Bahnen von Kommunikationssatelliten	49
2.20	Verteilung Wettersatelliten im geostationären Orbit	49
2.21	Leminiskate eines geosynchronen Orbits mit Inklination	50
2.22	Konfiguration der GPS-Satelliten	51
2.23	Höhen und Umlaufzeiten verschiedener Satelliten	53
2.24	Stabilisierungssysteme	54

2.25	Raketenstart – verschiedene Näherungen	59
2.26	Hohmann-Bahn, Übergangselipse	64
2.27	Übergangsbahn aus Ellipsenbögen	66
2.28	Halo Orbit um einen Lagrange Punkt	68
2.29	Lagrange-Punkte im rotierenden Bezugssystem	71
2.30	Lagrange Punkte im Sonne–Erde und Erde–Mond System	72
2.31	Bahnen der Voyager- und Pioneer-Sonden	74
2.32	Swing By an einem Planeten	75
2.33	Ulysses Orbit	77
2.34	VEEGA	77
3.1	Aufbau der Atmosphäre	83
3.2	Nachleuchtende Wolke	84
3.3	Atmosphärische Transmission	86
3.4	Struktur der Magnetosphäre	87
3.5	Prezipitation energiereicher Teilchen in die Atmosphäre	88
3.6	Strahlungsgürtel	88
3.7	Südatlantische Anomalie	89
3.8	Solar Terrestrische Beziehungen	89
3.9	Sensorklassen und ihre Beziehung	92
3.10	Discoverer-14	93
3.11	MKF6-Kamera auf Interkosmos	94
3.12	TIROS Modell und frühe Video-Aufnahme	94
3.13	Moderne Späher: LandSat und TIROS-N	94
3.14	Farbmischprojektor	95
3.15	Schwarz–Weiß-Film	97
3.16	Dunststreuung und Infrarotfilm	98
3.17	Mehr und weniger Dunst	98
3.18	Panchromatisch vs. Infrarotfilm	99
3.19	Vegetation panchromatisch und im Infrarotfilm	99
3.20	Frabfilm	100
3.21	IR-Farbfilm	100
3.22	Farb- und Falschfarbenaufnahme	101
3.23	Grauwerte RGB-Schichten	101
3.24	Gemischte RGB-Schichten	101
3.25	Spektrale Empfindlichkeiten	102
3.26	Spektrales Reflektionsvermögen gesunde und kranke Pflanzen	104
3.27	Amazonas-Abholzung	105
3.28	Bodenaufklärungsvermögen	105
3.29	Bodenaufklärungsvermögen	106
3.30	Winkelaufklärungsvermögen	106
3.31	Einfluss des Winkelaufklärungsvermögens	107
3.32	Charakteristische Kurve eines Films	108
3.33	SPOT-Aufnahme von Canberra	109
3.34	Erreichtes Bodenaufklärungsvermögen	110
3.35	Auge vs. Silizium	113
3.36	Evolution elektronischer bildgebender Verfahren	115
3.37	Vidicon	115
3.38	LandSat Videokameras	116
3.39	CCD	117
3.40	Farbzellen CCD	118
3.41	Kehrbesentechnik und MOMS-Doppeloptik	119
3.42	HRV auf SPOT	120
3.43	3D Rekonstruktion (SPOT 5)	121

3.44	MSS auf LandSat	122
3.45	LandSat MSS Wellenlängenbereiche	123
3.46	Datenformat eines Scanners	123
3.47	TM-Einzelbilder	125
3.48	Keweenaw Halbinsel in den TM-Bändern	126
3.49	Echt- und Falschfarben	127
3.50	Mixed Pixels	127
3.51	Linieneffekt	127
3.52	Harz gesehen von ETM+	128
3.53	Spektralkanäle verschiedener Imaging-Instrumente	130
3.54	Strahlungsgesetze	132
3.55	Detektor- und Objekttemperatur	134
3.56	Microbolometer	136
3.57	Prinzip eines IR-Scanners	137
3.58	Spektrale Signaturen von Gestein	138
3.59	Tschernobyl im IR, 1985 und 1986	139
3.60	Globale Infrarotaufnahme	140
3.61	Unterirdisches Wasser	141
3.62	Golfstrom im thermischen Infrarot	142
3.63	Mikrowellenradiometer	142
3.64	Scannendes Mikrowellenradiometer: Scanmuster auf der Bodenspur	145
3.65	Desertifikation: Polarisationsunterschiede bei 37 GHz	146
3.66	Abschmelzendes Eis: Polarisationsunterschiede bei 18 GHz	147
3.67	Kamtschatka mit SAR	148
3.68	Golf von Mexiko mit SAR	149
3.69	SeaSat Altimeter	150
3.70	Geoid	150
3.71	Sea Floor Mapping	151
3.72	SeaMountaineering	151
3.73	Altimeter-Signal	152
3.74	Scatterometer: Windgeschwindigkeiten	153
3.75	Prinzip des SAR	155
3.76	SAR	156
3.77	Interferogramm Gletscher	156
3.78	Cartwheel-SAR	158
3.79	Konfigurationen für Sounder	159
3.80	Limb-Sounder	160
3.81	Sciamachy Datenoutput für einen Tag	161
3.82	Sounder	162
3.83	Vulkan-Aerosol	164
3.84	Ubar im sichtbaren (rechts) und im Radar (links)	171
3.85	Struktur eines Pflanzenblatts	173
3.86	Spektrales Reflektionsvermögen Pflanzenblatt	173
3.87	Globale Landbedeckung	175
3.88	NDVI und Klimatologie	176
3.89	Aralsee	177
3.90	Untergrund und Pflanzenwuchs	178
3.91	Saline Valley, Ca, mit ASTER	179
3.92	Rückgang der Gletscher in der Mischabelgruppe	180
3.93	Geschwindigkeitsfeld Lambert Gletscher	181
3.94	Seewasser und Öl: spektrales Reflektionsvermögen	182
3.95	Ölverschmutzung Libanon-Konflikt 2006	183
3.96	Oberflächentemperatur Meere	184
3.97	El Niño	185

3.98 Die Farbe des Meeres	187
3.99 St. Andreas Graben	188
3.100 Vredefort Krater	189
3.101 Richat Struktur	190
3.1029/11 Ikonos	191
4.1 San Francisco	201
4.2 POES – ein Alleskönner	202
4.3 Optisches System von Sciamachy	207
4.4 Blickrichtungen Sciamachy	208
4.5 Sidney von TerraSAR-X	210
4.6 System Erde	214
4.7 Aletsch-Gletscher und Mount St. Helens von ASTER	216
4.8 CERES Werbeposter	217
4.9 MODIS Caspian Sea	219
4.10 CO-Map von AIRS auf Aqua	220
4.11 A-Train Konfiguration	220
5.1 Energiespektrum der Sonne	225
5.2 Schwankungen der Solarkonstante	226
5.3 Sonnenfleckenzahl und Solarkonstante	227
5.4 Variabilität des Sonnenspektrum	228
5.5 Variation Solarkonstante über 25 Jahre	229
5.6 Effektivtemperaturen von Sonne und Erde und Absorptionsbanden	231
5.7 Wechselwirkung geladener Teilchen mit Materie	233
5.8 Halbleiterdetektor	235
5.9 Aufbau Helios Teilchenteleskop	235
5.10 Pulshöhenmatrix	237
5.11 Winkelverteilungen	238
5.12 Zeitprofile	238
5.13 EPHIN Teilchenteleskop	239
5.14 Einfallrichtungen	240
5.15 KET	240
5.16 Geospace	242
5.17 Time of Flight (TOF)	242
5.18 Messung des elektrischen Feldes aus der Drift von Elektronen	245
5.19 Einige Phänomene der aktiven Sonne	246
5.20 Aufbau des Hard X-Ray Burst Spectrometers	247
5.21 Hard X-ray Imaging Spectrometer HXIS	247
5.22 Gamma-Ray Spectrometer GRS	248
5.23 HAO Coronagraph/Polarimeter	249
5.24 UVSP auf SMM	250
5.25 Phänomene im Flare	252
5.26 Solares Gammaskpektrum	252
5.27 Wechselwirkende und entweichende Teilchen	253
5.28 Zeitverlauf Teilchenbeschleunigung	255
5.29 Abnahme solarer Fluss und Effektivtemperatur mit dem Abstand von der Sonne	258
5.30 Bastille Day event	261
5.31 Bethe–Bloch equation	263
5.32 Bastille Day event: particle intensities and ionization rates	264
5.33 Bastille Day event: observed and modeled NO _x production and ozone depletion	265
5.34 Tracks of electrons and protons in a model atmosphere	266
5.35 Energy losses of protons: Monte Carlo vs. Bethe–Bloch	267
5.36 Energy losses of electrons: Monte Carlo vs. Bethe–Bloch	268
5.37 Ionization rates: combined electrons and protons	269

5.38	Ozone depletion following the October/November 2003 event series	271
5.39	October 1989 event and the atmosphere	272
5.40	Ionization during the solar cycle	273
5.41	Total ozone column during the solar cycle	274
5.42	Ozone variation without geomagnetic field	275
5.43	Variation in ozone and temperature	276
6.1	Rückführung des Filmmaterials	278
6.2	Lebensdauer Photosatellit	278
6.3	Rückführung analoger Daten auf digitalem Weg	279
6.4	Nachrichtenstrecke	280
6.5	Kommunikationssystem	281
6.6	Ungestörter Informationskanal	283
6.7	Shannon-Funktion	287
6.8	Binärcodes Alphabet	291
6.9	Diagramme von Quellen	294
6.10	Aliasing	295
6.11	Schallquellen	296
6.12	Menschliches Ohr	297
6.13	Dictionary of Tunes	299
6.14	Bild und Rasterung	300
6.15	Codierbaum	303
6.16	Codierbaum zum Huffman-Code	304
6.17	Ideales und reales Binärsignal	309
6.18	Entropiefluss ungestörter Übertragungskanal	310
6.19	Shannon-Grenze für fehlerfreien Empfang	312
6.20	Symmetrischer Binärkanal	314
6.21	Ähnlichkeitsdecodierung	316
6.22	Hamming(7,4) Code	317
6.23	Graphische Decodierung Hamming(7,4)	318
6.24	Blockcodierung in Matrixform	320
6.25	Antennengewinn Richtantenne	322
6.26	Regendämpfung	324
6.27	IntelSat V	325
7.1	Fehlende Pixel	329
7.2	Kernel zur Korrektur fehlender Pixel	330
7.3	Fehlende Zeilen	331
7.4	Poisson-Rauschen	332
7.5	Atmosphärische Streuung	334
7.6	Dunststreuung (terrestrisch)	335
7.7	Dunstkorrektur	336
7.8	Dunstkorrektur Bsp.	336
7.9	Kontrastanreicherung	337
7.10	Helligkeitswerte	338
7.11	Kontrastanreicherung in einem Kanal	339
7.12	Histogramm Gletscher und Fels	340
7.13	Kontrastanreicherung Fels-Gletscher	341
7.14	Ungerichtete Kantenanreicherung	342
7.15	Kantenanreicherung, Beispiel	343
7.16	Zweidimensionale Klassifikationsverfahren	344
7.17	Multitemporale 2D-Klassifikation	345
7.18	Klassifikation weißer Pixel	346
7.19	Regionale Landnutzung	347
7.20	JPEG-Kodierung und Zahl der Koeffizienten	349

7.21 Progressive und Raster-Datenübertragung	350
7.22 Fraktale Bilderzeugung	351
9.1 Kombinationen aus Abb. 3.48	370
9.2 Image angewandt auf ein $n \times m$ Array	370
9.3 Image angewandt auf ein $n \times m \times 3$ Array	371
9.4 Histogramme der Bänder aus Abb. 3.48	372
9.5 Glättung im Zufallsbild	373
9.6 Histogramme ungeglättet und geglättet	374

Tabellenverzeichnis

2.1	Kegelschnitte	28
2.2	Flugbahnen bei verschiedenen Abschussgeschwindigkeiten	30
2.3	Bahnparameter als Funktion der großen Halbachse	30
2.4	Übersicht über Bahnstörungen	34
2.5	Äußerer Wirkungsgrad einer Rakete	58
2.6	Ein- und Dreistufenrakete	61
2.7	Hohmann-Übergänge zu anderen Planeten	65
3.1	Massen und Leistungsaufnahme typischer Imaging Instrumente	90
3.2	Spektrale Empfindlichkeit MSS	103
3.3	Bodenauflösungsvermögen wichtiger Erdbeobachter	110
3.4	Auge vs. Silizium	114
3.5	Charakteristika SPOT HRV	120
3.6	Spektralbänder TM (LandSat)	124
3.7	Eigenschaften AVHRR	129
3.8	Materialien zur Messung im IR	134
3.9	Temperaturabhängigkeit Cutoff im IR	135
3.10	Frühe passive Mikrowelleninstrumente	145
3.11	Scatterometer im Erdorbit	153
3.12	Ground-Penetrating Mikrowelleninstrumente	154
3.13	SAR auf Raumfahrzeugen	157
3.14	Treibhauswirksame Spurengase	163
4.1	Übersicht LandSat	199
4.2	LandSat MSS, TM und ETM-Merkmale	200
4.3	Übersicht TIROS bis NOAA	203
4.4	Spektralbänder auf MERIS	206
4.5	Spektralkanäle MSRS	209
5.1	Energiekanäle Helios Teilchenteleskop	236
5.2	Bahnparameter der Planeten	257
6.1	Informationsgehalt Sprache	288
6.2	ASCII-Code	302
6.3	Beispielcodes	302
6.4	Redundanzreduktion verschiedener Codes	303
6.5	Beispiel zum Lempel–Ziv-Algorithmus	307
6.6	Übertragungskapazitäten	311
6.7	Hamming(7,4) Code	317

9.1	Langes Beispiel Lempel–Ziv	367
9.2	Erstes Auftreten einer Phrase	368

Literaturverzeichnis

- [1] **Warnung:** Ich habe – mit einem leichten Unbehagen – sehr viele Wikipedia und andere online Quellen im Literaturverzeichnis aufgenommen. Ich mag das zusammen sammeln von Informationen auf diese Weise für eine Vorlesung eigentlich nicht: Wikipedia und Konsorten liefern sehr viele Detailinformationen, trotz der ganzen Querverweise ist ein Zusammenhang aber natürlich nicht dargestellt. In diesem speziellen Skript sollte der Zusammenhang aber eigentlich durch den Text gegeben werden und Wikipedia nur als Unterstützung für Details (insbesondere zu den eher obskuren Satelliten) und als Sammlung für weitere Verweise dienen. Der Kramer [134] hätte an vielen Stellen den gleichen Zweck erfüllt. Und die teilweise langen Links direkt in den Text bzw. zu den Abbildungen zu setzen, macht den Text nicht wirklich übersichtlich.
- [2] R.E.W. Adams, W.E. Brown, and J. Culbert: Radar mapping, archaeology and ancient Maya land use, *Science* **213**, 1457, 1981 **171**
- [3] S. Agostinelli, et al.: Geant4 - a simulation toolkit. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 250–303, 2003. **267**
- [4] D.G. Andrews: Interstellar transport using today's physics, *AIAA Paper 2003-4691*, 2003, [http://www.andrews-space.com/images/videos/PAPERS/Pub-InterstellarTransportation\(200307\).pdf](http://www.andrews-space.com/images/videos/PAPERS/Pub-InterstellarTransportation(200307).pdf) **67**
- [5] O.C. Allkofer: *Teilchendetektoren*, Thiemig, München, 1971 **232, 233, 235**
- [6] O.C. Allkofer: *Introduction to cosmic radiation*, Thiemig, München, 1975 **232**
- [7] V. Aschoff: The early history of binary code, *IEEE Comm. Mag.*, **21**, (1)4–10, 1983 **290**
- [8] G. Asras, M. Fuchs, E.T. Kanemasu, and J.L. Hartfield: Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat, *Agron. J.* **76**, 300, 1984 **174**
- [9] D.N. Baker, Kanekal, J.B. Blake, L.B. Callis, B. Klecker, and R.A. Mewaldt: High-energy electron measurements and atmospheric coupling: SAMPEX results, *EOS* **76**, No. 17, A32A-3, 1995
- [10] J.D. Baker: *Planet Earth - the view from space*, Harvard University Press, Cambridge, 1990 **110, 168, 193, 212, 216**
- [11] E.C. Barrett und L.F. Curtis: *Introduction to environmental remote sensing*, Chapman and Hall, London, 1982 **86, 103, 138, 171, 173**
- [12] S.J. Bauer: *Physics of planetary ionospheres*, Springer, Berlin, 1973 **37**
- [13] J.K. Beatty, B. O'Leary, and A. Chaikin: *The New Solar System*, Cambridge University Press, Cambridge, 1990 **74, 77**
- [14] A. Belehaki, N. Jakowski, and B.W. Reinisch: Plasmaspheric electron content derived from GPS TEC and digisonde ionograms. *Adv. Space Res.*, **33**, (6)833–837, 204 **211**
- [15] R.E. Benestad: *Solar activity and Earth's climate*, Springer, 2004 **230**
- [16] Bergmann-Schaefer: *Lehrbuch der Experimentalphysik III: Optik*, de Gruyter, 1978 **106**
- [17] B. Bertotti und P. Farinella: *Physics of the Earth and the solar system*, Kluwer, 1990 **26, 34, 42, 73, 77, 309, 325**

- [18] R.K. Bock and A. Vasilescu: The Particle detector briefbook, Springer, 1998 232
- [19] J.D. Bohlin, K.F. Frost, P.T. Burr, A.K. Guha, and G.L. Withbroe: Solar Maximum Mission, *Solar Phys.* **65**, 5, 1980 246
- [20] J.-L. Bézy, S. Delwart and M. Rast: MERIS – A new generation of ocean-colour sensor onboard EnviSat, *ESA Bulletin 103*, August 2000, 48–56, auch <http://esapub.esrin.esa.it/bulletin/bullet103/besy103.pdf> 207
- [21] J.-L. Bézy, S. Delwart and M. Rast: MERIS – A new generation of ocean-colour sensor onboard EnviSat, *ESA Bulletin 103*, August 2000, 48–56, auch <http://esapub.esrin.esa.it/bulletin/bullet103/besy103.pdf> 206
- [22] R.E. Bilstein: *Stages to Saturn – A technological history of the Apollo/Saturn launch vehicles*, NASA, The NASA History Series, 1996, <http://history.nasa.gov/SP-4206/sp4206.htm> 59
- [23] H. Bischoff: SAR-Lupe – höchstauflösende Bilder aus dem Weltraum als Datengrundlage für GIS, megatel Informations- und Kommunikationssysteme, 2003, <http://www.intergeo.de/archiv/2003/Bischoff.pdf> 210
- [24] F. Blechinger, D.E. Charlton, R. Davances, B. Harnisch, B.P. Kunkel, R. Meynart, A. Novi, E. O’Mongain, H. Schwarz and P.N. Slater: High-resolution imaging spectrometer (HRIS): optics, focal plane, and calibration, in *Imaging Spectrometry of the Terrestrial Environment* (ed. G. Vane), Proc. SPIE Vol. 1937, 207–224, 1993 169
- [25] J. Bodechtel und H.-G. Gierloff-Emden: *Weltraumbilder der Erde*, List, 1969 5, 6
- [26] A. Bohrman: *Bahnen künstlicher Satelliten*, BI, 1966 26, 32, 38, 39, 41, 77
- [27] H.-J. Bolle: Führt der Anstieg atmosphärischer Spurengaskonzentration zum “Klimakollaps”?, *Phys. Blätter*, **43/7**, 240, 1987 215
- [28] Bormann: *Erdfernerkundung*, Veröffentlichungen des Zentralinstituts für Physik der Erde # 65, Potsdam, 1980 106, 108, 112, 155
- [29] H. Budzier, V. Krause, G. Gerlach, and D. Wassiliew: MWIR- Wärmebildkamera mit Mikrobolometer, *tm – technisches messen*, **74**, 450–455, 2007 136
- [30] O. Bschorr und A. Leibold: Das Einfang- und Katapultvermögen von Planet/Mond-Systemen, *Raumfahrtforschung* **13**, 132, 1968 74
- [31] Callis, L.B., Boughner, R.E., Baker, D.N. et al., Precipitating electrons: evidence for effects on mesospheric odd nitrogen, *Geophys. Res. Lett.* **23**, 1901, 1996. 270
- [32] Callis, L.B., Baker, D.N., Natarajan, M., et al., A 2-D model simulation of downward transport of NO_y into the stratosphere: effects on the austral spring O₃ and NO_y, *Geophys. Res. Lett.* **23**, 1905, 1996. 270
- [33] N. Calder: *Raumschiff Erde*, vgs, Köln, 1992 105, 139, 151
- [34] Canadian Center for Remote Sensing: *Fundamentals of remote sensing*, http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/index_e.php 21
- [35] M. Chipperfield: The TOMCAT offline chemical transport model, UGAMP International Report 44a, <http://www.env.leeds.ac.uk/~martyn/slimcat.html>, 1996. 266
- [36] N. Chomsky: *Failed States*, Metropolitan Books 2006 13
- [37] N. Chorier: *Indien von oben*, Frederking und Thaler, 2007 10
- [38] B.J. Choudhuri: *Desertification*, in [82], 1993 146
- [39] P.R. Christensen, B.M. jakosky, H.H. Kiefer, M.C. Malin, H.Y. McSween, K. nealson, G.L. Mehall, S.H. silverman, S. ferry, M. Caplinger and M. Ravine: The Thermal Emission Imaging System (THEMIS) for the Mars 2001 Odyssey Mission, *Space Sci. Rev.* **110**, 85–130, 2004, auch http://www.mars.asu.edu/christensen/docs/christensen_themis_ssr.pdf 139
- [40] E.W. Cliver, D.J. Forrest, H.V. Cane, D.V. Reames, R.E. McGuire, T.T. von Rosenvinge, and R.J. MacDowall: Solar flare nuclear gamma-rays and interplanetary proton events, *Astrophys. J.* **343**, 953, 1989 253
- [41] A.P. Cracknell und L.W.B. Hayes: *Introduction to remote sensing*, Taylor und Francis, 1991 8, 11, 21, 86, 123, 129, 137, 139, 141, 142, 150, 152, 153, 164, 193, 328, 341, 353
- [42] P.J. Crutzen, I.S.A. Isaksen, and G.C. Reid: Solar Proton Event - Stratospheric Source of Nitric Oxide, *Science* **189**, 457, 1975 262

- [43] P.J. Curran: *Principles of remote sensing*, Longmann, New York, 1985 116, 171, 193, 328
- [44] R.S. DeFries, and J.R.G. Townshend: Global land cover: comparison of ground-based data sets to classifications with AVHRR data, in [60], 1994 175
- [45] S. de Haan and J. de vries: Upper air humidity observations using GPS, KNMI Niederlande, Jahresbericht, http://www.knmi.nl/research/biennial/05-06_Humidity_GPS.pdf, 2006 211
- [46] Y.-L. Desnos, C. Buck, J. Guijarro, J.-L. Suchail, R. Torres and E. Attema: ASAR – EnviSat’s Advanced Synthetic Aperture Radar, *ESA Bull.* 102, May 2000, 91–100, auch <http://esapub.esrin.esa.it/bulletin/bullet102/Desnos102.pdf> 207
- [47] V. Desportes: *La Guerre probable – Penser autrement*, Economica, Paris, 2007 14
- [48] J. Dozier and A.F.H. Goetz: HIRIS – EOS instrument with high spectral and spatial resolution, *Photogrammetria (PRS)* 43, 167–180, 1989, <http://fiesta.bren.ucsb.edu/~dozier/Pubs/DozierGoetz1989.pdf> 168
- [49] C. Drewniok: *Der Einsatz von Satelliten zur Erdbeobachtung*, CENSIS – Center for Science and International Security, Univ. Hamburg, FB Informatik, 1991 46, 47, 279
- [50] J.A. Dunne and E. Burgess: *The Voyage of Mariner 10 – Mission to Venus and Mercury*, National Aeronautics and Space Administration, 1978, <http://history.nasa.gov/SP-424/sp424.htm> oder http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19780019203_1978019203.pdf 74, 76, 117
- [51] M. Endemann, P. Gare, J. Langen, H. Nett and C.J. Readings: MIPAS – an EnviSat instrument for atmospheric chemistry and climate research, *ESA Bull.* 101, Feb. 2000, <http://esapub.esrin.esa.it/bulletin/bullet101/endemann.pdf> 206
- [52] A. Engel and C. van den Broeck: *Statistical mechanics of learning*, Cambridge, 2001 297
- [53] ESA: *ASAR – Science and Applications*, SP-1225, 1998 http://earth.esa.int/pub/ESA_DOC/SP_1225.pdf, 23.2.2008 207
- [54] R.M. Fano: *Transmission of information*, Wiley, New York, 1962 285
- [55] R.M. Fano: *Informationsübertragung - eine statistische Theorie der Nachrichtenübertragung*, Oldenbourg, München, 1966 285, 287, 325
- [56] F.A. Fischer: *Einführung in die statistische Übertragungstheorie*, Bibliographisches Institut, Mannheim, 1969 295
- [57] Y. Fisher (Hrsg.): *Fractal image compression*, Springer, 1996 351
- [58] B. Fleck, V. Domingo, and A.I. Poland (eds.): *The SOHO mission*, Kluwer, Dordrecht, 1995 243
- [59] A.M. Florini and Y.A. Dehqanzada: *No More Secrets?: Policy Implications of Commercial Remote Sensing Satellites*, Carnegie paper #1, July 1999, <http://www.carnegieendowment.org/publications/index.cfm?fa=view&id=150> 200
- [60] G. Foody und P. Curran: *Environmental remote sensing from regional to global scales*, Wiley, 1994 16, 111, 129, 386, 390
- [61] Forman, M.A., and Webb, G.M., Acceleration of energetic particles, in: Stone R.G. and Tsurutani B.T. (Eds.), *Collisionless shocks in the heliosphere*, AGU Geophys. Mon. 34, 1985. 267
- [62] D.J. Forrest, E.L. Chupp, J.M. Ryan, M.L. Cherry, I.U. Gleske, C. Reppin, K. Pinkau, E. Rieger, G. Kanbach, R.L. Kinzer, G. Share, W.N. Johnson, and J.D. Kurfess: The Gamma Ray Spectrometer for the Solar Maximum Mission, *Solar Phys.* 65, 15, 1980 248
- [63] P. Fricker: ADS40 – progress in digital aerial data collection, *Photogrammetric Week 01*, 105–116, 2001, <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo01/Fricker.pdf> 131
- [64] H. Friedman: *Die Sonne*, Spektrum, 1987 246
- [65] C. Fröhlich and J. Lean: Solar radiative output and its variability: Evidence and mechanisms, *Astron. Astrophys. Rev.*, 12, 273–320, 2004 229

- [66] M. Gadsden and W. Schröder: *Noctilucent Clouds*, Springer, Physics and Chemistry in Space 18 Planetology, Berlin, 1989 84
- [67] Geant4, <http://wwwasd.web.cern.ch/wwwasd/geant4/geant4.html>, 2003. 267
- [68] R.H. Giese: *Weltraumforschung*, BI, 1966 54, 58, 61, 67
- [69] R.H. Giese: *Einführung in die Astrophysik*, BI-Wissenschaftsverlag, Mannheim, 1981 74, 75
- [70] C. Ginzler: *Infrarotbilder für die Umweltbeurteilung – Erste Untersuchung der ADS40 Daten 2005*, swisstopo Kolloquium 16.2.2007, http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/fr/home/docu/colloquia/coll_06_07.parsys.78277.downloadList.50125.DownloadFile.tmp/2wslginzler.pdf 131
- [71] G. Goeckler: Characteristics of solar and heliospheric ion populations observed near Earth, *Adv. Space Res.* 4, (2-3)127, 1984. 267
- [72] A.F.H. Goetz and C.O. Davis: High resolution imaging spectrometer (HIRIS): Science and instrument, *Int. J. Imaging Systems and Technology* 3, (2)131–143, 1991 168
- [73] Goldstein: *Klassische Mechanik* 26
- [74] J. Gosling, Asbridge, J.R., Bame, S.J., et al.: Interplanetary ions during an energetic storm particle event, *J. Geophys. Res.* 86, 547, 1981. 267
- [75] M. Gottwald (ed): *Sciamachy – Monitoring the changing Earth’s atmosphere*, DLR, Verlagsservice RAU, 2006, online unter <http://atmos.caf.dlr.de/projects/scops/161,205,207,208>
- [76] T.T. Graedel and P.J. Crutzen: *Chemie der Atmosphäre*, Spektrum - Akademischer Verlag, Weinheim, 1994 162, 164
- [77] T.T. Graedel and P.J. Crutzen: The changing atmosphere, in *Managing planet Earth*, W.H. Freeman and Co., New York, 13 - 24, 1989 164
- [78] T. Grams: *Codierungsverfahren*, BI Hochschultaschenbücher 625, Mannheim, 1986 305, 316, 325
- [79] W. Greiner: *Theoretische Physik: Mechanik II*, 2. Aufl. Harri Deutsch, Thun, 1977 26
- [80] H. Großmann: *Satelliten-Thermalbilder - ein neues Hilfsmittel für die Umweltforschung?*, Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung, Bonn, ISBN 3-87994-016-9, 1984 138
- [81] A. Grün and E. Baltsavias: *Satellitenfernerkundung*, ETH Zürich, 1998, <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/show?type=lehr&nr=98&part=text> 95
- [82] R.J. Gurney, J.L. Foster, und C.L. Parkinson (Hrsg.): *Atlas of satellite observations related to global change*, Cambridge, 1993 21, 385, 387, 390, 391, 392, 393
- [83] M. Gurtner: *Karten lesen – Handbuch zu den Landeskarten*, Gemeinschaftsausgabe Bundesamt für Landestopographie und SAC, 1998 150
- [84] H. Häberle: *Informationstheoretische Grundlagen der Digitaltechnik*, VDI-Bildungswerk, 1966 282
- [85] W. Hallmann und W. Ley: *Handbuch der Raumfahrttechnik*, Hanser, München, 1988 54
- [86] T. Hammerschmidt: Deutscher Aufklärungssatellit, telepolis, 3.1.2007, <http://www.heise.de/tp/r4/artikel/24/24342/1.html> 211
- [87] R.W. Hamming: *Coding and information theory*, Prentice-Hall, New York, 1980 314
- [88] H. Handels: *Medizinische Bildverarbeitung*, Teubner, Leipzig, 2000 353
- [89] R.C. Harriss: Tropospheric chemistry, in [82], 1993 163, 164
- [90] Ph. Hartl: *Fernwirktechnik der Raumfahrt*, Springer, Berlin, 1977 311, 312, 325
- [91] B. Hassenstein: *Biologische Kybernetik*, Quelle und Meyer, Heidelberg, 1965 297
- [92] T. Hauf, Wendling, P., and K.-T. Kriebel: Wolken, Klima, und Umwelt, *Physik in unserer Zeit*, 22, 59, 1991 215
- [93] M.P. Hellman: *SAR Polarimetry Tutorial (Beta Version 0.1a)*,
- [94] G.T. Herman: *Image reconstruction from projections: the fundamentals of computer tomography*, Academic Press, New, 1980 160
York

- [95] E. Herter und H. Rupp: *Nachrichtenübertragung über Satelliten*, Springer, Berlin, 1979 322, 325
- [96] E. Herter und W. Lörcher: *Nachrichtentechnik: Übertragung - Vermittlung - Verarbeitung*, Hanser, München, 1992 295, 325
- [97] H. Heuseler (Hrsg.): *Europa aus dem All*, dva/Westermann, 1974 5
- [98] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and J. Collins: *GPS - theory and practice*, Springer, Wien, 1992 52
- [99] J.T. Houghton, F.W. Taylor, and C.D. Rodgers: *Remote sounding of atmospheres*, Cambridge University Press, Cambridge, 1984 160
- [100] J.T. Houghton: *The physics of atmospheres*, Cambridge University Press, Cambridge, 1986 162
- [101] J.T. Houghton: *Global warming*, Cambridge University Press, Cambridge, 1997 162
- [102] Hudson et al., 1986 226
- [103] P. Hupfer (Hrsg.): *Das Klimasystem der Erde*, Akademie-Verlag, Leipzig, 1991 216
- [104] E. Imhof: *Gelände und Karte*, Rentsch, 1950 48, 98, 327, 328
- [105] Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC: *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, Genf, 2001, www.ipcc.ch 5, 162, 227
- [106] Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis of Climate Change*, Genf, 2007, www.ipcc.ch 5, 162, 216, 229
- [107] C.H. Jackman and McPeters, R.D., The response of ozone to solar proton events during solar cycle 21: a theoretical interpretation. *J. Geophys. Res.* 90, 7955–7966, 1985. 270
- [108] C.H. Jackman, R.D. McPeters, G.J. Labow, C.J. Praderas, and E.L. Fleming (2001): Measurements and model predictions of the atmospheric effects due to the July 2000 solar proton event, *Geophys. Res. Lett* **28**, 2883 261
- [109] K. Jacob: Das Meer unter der Wüste, *Bild der Wissenschaft 1/1995*. 18, 1995 140, 178
- [110] K. Jacobsen, G. Konecny and H. Wegmann: High resolution sensor test comparison with SPOT, KFA1000, KVR1000, IRS-1C and DPA in Lower Saxony, in IAPRS 32/4 (eds. D. Fritsch, M. English and M. Sester), <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/commIV/jacob43.pdf> 95
- [111] B. Jähne: *Digitale Bildverarbeitung*, Springer, 2002 328, 332, 341, 353
- [112] P. Janle: Das Bild der Venus nach der Magellan-Mission, Teil 1 -3, *Sterne und Weltraum* 33, No. 10 - 12, S. 686, 1994 158
- [113] J. Jansen: *Kriegsschauplatz Kiel*, Wachholtz, Neumünster, 1989 11
- [114] F.C. Jones and Ellison, D. C., The plasma physics of shock acceleration, *Space Sci. Rev.* 58, 259, 1991. 267
- [115] M.-B. Kallenrode: *Space Physics*, Springer, 2004 88, 242, 245
- [116] M.-B. Kallenrode: *Physik der Atmosphäre*, Vorlesungsskript, Uni Osnabrück, 2006, <http://www.sotere.uni-osnabrueck.de/Lehre/skript/atmo-master.pdf> 186
- [117] M.-B. Kallenrode: *Modeling transport*, Vorlesungsskript, Universität Osnabrück, 2007, <http://www.sotere.uni-osnabrueck.de/Lehre/skript/transport-master.pdf>
- [118] M.-B. Kallenrode: *Simple Simulation: Systemtheorie und SIMULINK*, Vorlesungsskript, Universität Osnabrück, 2008, http://www.sotere.uni-osnabrueck.de/Lehre/skript/simulink_small.pdf
- [119] Kallenrode, M.-B.: Current views on impulsive and gradual solar energetic particle events, *J. Phys. G* **29**, 965–981, 2003, http://www.sotere.uni-osnabrueck.de/pubs/paper/current_views.pdf 255, 266
- [120] M.-B. Kallenrode: Radial dependence of solar energetic particle events, in *Connecting Sun and heliosphere*, Proc. Solar Wind 11/SOHO 16 (eds. B. Fleck and Th. Zurbuchen), ESA-SP592, 87–94, 2005, http://www.sotere.uni-osnabrueck.de/pubs/paper/kallenrode_solarwind_05.pdf 255
- [121] M.-B. Kallenrode and G. Wibberenz: Particle injection following solar flares on 1980 May 28 and June 8: Evidence for different injection time histories in impulsive and gradual events, *Astrophys. J.* **376**, 787, 1991, <http://www.sotere.uni-osnabrueck.de/pubs/paper/apj91.pdf> 255

- [122] M.-B. Kallenrode: The temporal and spatial development of MeV proton acceleration at interplanetary shocks, *J. Geophys. Res.* **102**, 22347 - 22363, 1997, <http://www.sotere.uni-osnabrueck.de/pubs/paper/97JA01678.pdf> 266
- [123] M.-B. Kallenrode, E. Rieger, G. Wibberenz, and D.J. Forrest: Energetic charged particles resulting from flares with gamma-ray emission, *Proc. 20th Internat. Cosmic Ray Conf.* **3**, 70, 1987, <http://www.sotere.uni-osnabrueck.de/pubs/paper/icrc87.pdf> 253
- [124] R.S. Kandel: *Earth and Cosmos*, Pergamon Press, 1980 213
- [125] W.W. Kelley: *Der Heimatplanet*, Zweitausendeins, Frankfurt, 1988 5
- [126] D. Kerner und I. Kerner: *Der Klima-Report*, Kiepenheuer und Witsch, Köln, 1990 216
- [127] W. Kertz: *Einführung in die Geophysik, I und II*, BI Hochschultaschenbücher, Bibliographisches Institut, Mannheim, 1971, Neuauflage 1989 37, 41
- [128] M.D. King et al. (eds.): *Our changing planet – the view from space*, Cambridge University Press, 2007 21
- [129] C.R. Kitchin: *Astrophysical Techniques*, Adam Hilger, Bristol, 1984 108, 115, 117, 118, 193
- [130] K. Kleinknecht: *Detektoren für Teilchenstrahlung*, Teubner, 1992 232
- [131] R. Klingholz: *Marathon im All*, Ullstein, Berlin, 1992 322
- [132] G.F. Knoll: *Radiation detection and measurement*, Wiley, 2000 232
- [133] A. Kowal und L. Dessinow: *In den Weltraum zum Nutzen der Menschheit*, Verlag Progress Moskau und Staatsverlag der Deutschen Demokratischen Republik, 1987 95, 104, 112
- [134] H.J. Kramer: *Observations of the Earth and its Environment – Survey of missions and sensors*, Springer, 2002 47, 49, 50, 72, 82, 90, 104, 107, 110, 113, 114, 115, 129, 130, 134, 135, 145, 153, 154, 157, 158, 159, 162, 163, 192, 199, 200, 203, 221, 384
- [135] A. Krass: *Verification - How much is enough?*, Lexington Books, D.C. Heath and Co., Lexington MA, 1985 39, 51
- [136] D. Kreß: *Theoretische Grundlagen der Signal- und Informationsübertragung*, Vieweg, Braunschweig, 1977 282
- [137] K. Küpfmüller: *Einführung in die theoretische Elektrotechnik*, Springer, Berlin, 1990 289
- [138] A. Kumar Maini and V. Agrawal: *Satellite technology*, Wiley, 2006 54
- [139] H. Kunow, G. Wibberenz, G. Green, R. Müller-Mellin, M. Witte, und H. Hempe: Das Kieler Experiment zur Messung der kosmischen Strahlung zwischen 1.0 und 0.3 AU (E6), *Raumfahrtforschung* **5**, 253, 1975 235
- [140] H. Kunow, G. Wibberenz, G. Green, H. Hempe, B. Iwers, R. Müller-Mellin, M. Witte, J. Fuckner, and A. Popp: *Ein Experiment zur Messung der kosmischen Strahlung an Bord der Sonnensonden Helios 1 und 2 (Experiment 6)*, Forschungsbericht, BMFT-FB-W81-016, 1981 235
- [141] H. Kunow, R. Müller-Mellin, G. Green, und H. Sierks: *Electron Proton Helium Instrument EPHIN*, Ausschreibung, IFKKI, Kiel, 1989 239
- [142] H. Kunow, G. Wibberenz, G. Green, R. Müller-Mellin, and M.-B. Kallenrode: Energetic particles in the inner heliosphere, in *Physics of the inner heliosphere* (eds. E. Marsch and R. Schwenn), Springer, Berlin, 1991 252
- [143] T.G. Kyle: *Atmospheric transmission*, Pergamon, Oxford, 1991 112
- [144] S. Lange: Der erste SAR-Lupe Satellit im All, *Strategie und Technik*, Feb. 2007, 14–16
- [145] R.S. Lancaster, D.R. Skillman, W.C. Welch, J.D. Spinhirne, K.F. Manizade, and B.P. Beecken: The Economical Microbolometer-Based Environmental Radiometer Satellite (EMBERSat) Designed for Forest Fire Detection and Monitoring, 2-25 - 2-28; 4; International Thermal Detectors Workshop (TDW 2003), 2004, <http://hdl.handle.net/2060/20040068208>, http://ssed.gsfc.nasa.gov/code693/tdw03/proceedings/docs/session_2/Lancaster.pdf 20, 135
- [146] J. Lean: Variations in the Sun's radiative output, *Rev. of Geophys.* **29**, 4, 505, 1991 40, 227

- [147] J.-P. Lebreton, C. Sollazzo, T. Blancquaert, O. Witase and the Huygens Mission Team: High ambitions for an outstanding planetary mission: Cassini-Huygens, *ESA Bull.* **120**, Nov. 2004, http://www.esa.int/esapub/bulletin/bulletin120/bul120b_lebreton.pdf 158, 260
- [148] S. Leprince, S. Barbot, F. Ayoub, and J.-P. Avouc: Automatic, precise, ortho-rectification and co-registration for satellite image correlation: application to seismotectonics, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **45**, 1529–1558, 2007 181, 328
- [149] S. Leprince, E. Berthier, F. Ayoub, C. Delacourt, and J.-P. Avouc: Monitoring Earth surface dynamics with optical imaging, *ESO* **89**, (1)1–2, 2008 181, 328
- [150] J.S. Levine (ed.): *Space Opportunities for tropospheric chemistry*, NASA Conf. Publ. 2450, Washington, DC, 1985 163
- [151] G.H. Liljequist und K. Cihak: *Allgemeine Meteorologie*, Vieweg, Braunschweig, 1977 83
- [152] C.S. Lingle, D.R. Fatland, V.A. Voronina, K. Ahlnäs and E.N. Troshina: Dynamic Behavior of the Bering Glacier-Bagley Icefield System During a Surge, and Other Measurements of Alaskan Glaciers with ERS SAR Imagery, *Proc. 3rd ERS Symp.*, Florence, 1997, <http://earth.esa.int/workshops/ers97/papers/lingle2/> 157
- [153] H. Lippert: *Lehrbuch Anatomie*, Urban und Schwarzenberg, München, 1990 297
- [154] E. Löffler: *Geographie und Fernerkundung*, Teubner, 1994 46, 97, 99, 116, 119, 120, 122, 127, 193, 337, 344, 345, 353
- [155] R.M. Lucas and A.R. Harrison: Snow monitoring in the United Kingdom using NOAA AVHRR imagery, in [60], 1994 180, 346
- [156] K. Luchner: *Physik ist überall*, Ehrenwirth, München, 1994 74
- [157] H.D. Lüke: *Signalübertragung*, Springer, 1992 291, 325
- [158] D.J. MacKay: *Information theory, inference and learning algorithms*, Cambridge, 2003 297, 325
- [159] R.M. MacQueen, A. Csoeke-Poeckh, E. Hildner, L. House, R. Reynolds, A. Stanger, H. Tepoel, and W. Wagner: The High Altitude Observatory Coronagraph/Polarimeter on the solar Maximum Mission, *Solar Phys.* **65**, 91–107, 1980 249
- [160] A.F. Marfeld: *Astronautik*, Safari-Verlag, Berlin (Sonderausgabe zur Apollo-Mondlandung), 1969 67
- [161] A.E. Marini: ALTLID: The technology development programme for ESA's satellite-borne atmospheric Lidar, *ESA Bull.* **95**, August 1998, <http://esapub.esrin.esa.it/bulletin/bullet95/MARINI.pdf> 170
- [162] H. Marko: Grundlagen der Information und Kommunikation, *Verhandlungen der Ges. dt. Naturforscher und Ärzte*, **113**, 1984 312
- [163] W. Markwitz, und R. Winter (Hrsg.): *Fernerkundung - Daten und Anwendungen*, Wichmann, Karlsruhe, 1989 127
- [164] C.R. McClain, G. Feldman und W. Esaias: *Oceanic biological productivity*, in [82] 187
- [165] B. McGuire: *Global Catastrophe - A very short introduction*, Oxford University Press, Oxford, 2006 189, 191
- [166] H.R. McMaster: On War: Lessons to be Learned, *Survival* **50**, 1, International Institute for Strategic Studies IISS, London, 2008 14
- [167] Meyer, ct 51
- [168] T. Mikaelian: *Microbolometer Project*, York Univ. & Spectral Applied Res. Inc., 19.7.2002, <http://web.mit.edu/tsoline/www/Spectral-microbolometer.pdf> 136
- [169] A.C. Millington, J. Wellens, J.J. Settle, and R.J. Saull: Explaining and monitoring land cover dynamics in drylands using multi-temporal analysis of NOAA AVHRR imagery, in [60], 1994 175
- [170] MIT Open Course Ware: *16.885J / ESD.35J Aircraft Systems Engineering*, Fall 2005, <http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Aeronautics-and-Astronautics/16-885JFall-2005/CourseHome/index.htm> 63

- [171] MIT Open Course Ware: *12.S56 GPS: Civilian Tool or Military Weapon?*, Fall 2005, <http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Earth--Atmospheric--and-Planetary-Sciences/12-S56Fall-2005/CourseHome/index.htm> 51
- [172] C. N. Mitchell, L. Alfonsi, G. De Franceschi, M. Lester, V. Romano and A. W. Wernik: GPS TEC and scintillation measurements from the polar ionosphere during the October 2003 storm, *Geophys. Res. Lett.* **32** doi:10.1029/2004GL021644, 2005 211
- [173] B.J. Murphy and R.D. Nance: Mountain belts and the supercontinent cycle, *Scientific American* **266/4**, 34, 1992 213
- [174] S. Natterer: *The mathematics of computerized tomography*, Wiley, New York, 1986 160
- [175] G. Neukum: *High Resolution Stereo Camera (HRSC) - Mars 94 mission*, Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt, Oberpfaffenhofen, DLR-IB 90/3, 1990 130
- [176] R.E. Newell, H.G. Reichle, Jr., and W. Seller: Carbon monoxide from the burning earth, *Scient. Amer.* **260**, 82, 1989 163
- [177] E.G. Njoku und O.B. Brown: *Sea surface temperature*, in [82] 184, 185
- [178] NZZ: Die Welt, das All und der ganze Rest, NZZ-Dossier, #56, 7.3.2008, B1, Text auch unter http://www.nzz.ch/nachrichten/medien/die_welt_das_all_und_der_ganze_rest_1.684611.html 7
- [179] NZZ, K. Haupt: Die Schweiz in 660 560 000 000 Pixeln, NZZ-Dossier, # 56, 7.3.2008, B2, auch unter http://www.nzz.ch/nachrichten/medien/die_schweiz_in_660_560_000_000_pixeln_1.684618.html
- [180] L. O’Gorman, M.J. Sammon and M. Seul: *Practical Algorithms for Image Analysis*, Cambridge, 2008 334, 353, 369
- [181] L.E. Orwig, K.J. Frost, and B.R. Dennis: The Hard X-Ray Burst Spectrometer on the Solar Maximum Mission, *Solar Phys.* **65**, 25, 1980 246, 247
- [182] D. Parson: *Dictionary of tunes and musical themes*, Spencer and Brown, Cambridge, 1975 298
- [183] J.P. Peixoto and A.H. Oort: *Physics of climate*, AIP, New York, 1992 231
- [184] Pelkham: DuMont, Köln 9
- [185] W.W. Peterson and E.J. Weldon: *Error correcting codes*, MIT Press, Cambridge, 1972 317
- [186] Porter, H.S., Jackman, C.H., and Green, A.E.S., Efficiencies for production of atomic nitrogen and oxygen by relativistic proton impact in air, *J. Chem. Phys.* **167**, 154–167, 1976. 267
- [187] J.R. Primack: Gamma-ray observations of orbiting nuclear reactors, *Science* **244**, 397, 1989 148
- [188] J.G. Proakis und M. Salehi: *Grundlagen der Kommunikationstechnik*, Pearson, 2004 307, 325, 350
- [189] M. Quack: *Wechselwirkung solarer energiereicher Teilchen mit der Atmosphäre*, Diplomarbeit, Uni Osnabrück, 2001, <http://www.sotere.uni-osnabrueck.de/pubs/examensarbeiten/diplquack.pdf> 263, 264, 266
- [190] U. Quernheim: *Satellitenkommunikation – Kanalmodellierung und Protokollbewertung*, ABI Bd. 1, Verlag der Augustinus Buchhandlung, 1993 309, 324, 325
- [191] V. Ramanathan, B.R. Barkstrom, and E.F. Harrison: Climate and the Earth’s radiation budget, *Physics Today* /**5**, 22, 1989 215
- [192] J. Radon: Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten, *Ber. Verh. Sächs. Akad. Wiss. Leipzig, Math. Phys.* K1 **69**, 262, 1917 160
- [193] G. Ratier, G. Levrini, A. Popescu, T. Paulsen, C. Readings and J. Langen: GOMOS: EnviSat’s contribution to measuring long-term trends in ozone and other trace gases, *ESA Bull.* **97**, March 1999, <http://esapub.esrin.esa.it/bulletin/bullet97/ratier.pdf> 207
- [194] M. Redfern: *The Earth – a very short introduction*, Oxford University Press, Oxford, 2003 5, 151

- [195] A. Rest, J. beneviste, M. Roca, G. Levrini and J. Johannessen: The EnviSat Radar Altimeter System (RA-2), *ESA Bull.* 98, June 1999, <http://esapub.esrin.esa.it/bulletin/bullet98/RESTI.PDF> 149, 206
- [196] W.R. Rossow: *Clouds*, in [82], 1993 140
- [197] A.E. Roy: *Orbital motion*, Adam Hilger, Bristol, 1982 42
- [198] W.G. Rees: *Physical principles of remote sensing*, Cambridge University Press, Cambridge, 1990 108, 146, 193
- [199] H.G. Reichle, Jr., V.S. Conners, J.A. Holland, W.D. Hypes, H.A. Wallio, J.C. Casas, B.B. Gormsen, M.S. Saylor, and W.D. Heske: Middle and upper atmospheric carbon monoxide mixing ratios as measured by a satellite-born remote sensing sensor during November 1981, *J. Geophys. Res.* 91, 10865, 1986 163
- [200] U. Renner, J. Nauck and N. Balteas: *Satellitentechnik*, Springer, 1988 49, 280, 325
- [201] E. Rieger: Nuclear reactions in flares, in *Eruptive solar flares* (eds. Z. Svestka, B. Jackson and M.E. Machado), Springer Lecture Notes in Physics # 399, Springer, Berlin, 1992 252
- [202] N. Roberts: The global environmental future, in *The changing global environment* (ed. N. Roberts), Blackwell, Cambridge, 1994 214
- [203] J.G. Roederer: *Introduction to the physics and psychophysics of music*, Springer, Berlin, 1975; neue deutschsprachige Auflage 1993, ebenfalls bei Springer, unter dem Titel *Physikalische und psychoakustische Grundlagen der Musik* 297, 298
- [204] Roedel: *Physik der Atmosphäre*, Springer 162
- [205] G. Rohen, C. von Savigny, M. Sinnhuber, E.J. Llewellyn, J.W. Kaiser, C.H. Jackman, M.-B. Kallenrode, J. Schroter, K.U. Eichmann, H. Bovensmann, and J.P. Burrows: Ozone depletion during the solar proton events of October/November 2003 as seen by SCIAMACHY, *J. Geophys. Res.* 100, A09S39, 2005, <http://www.sotere.uni-osnabrueck.de/pubs/paper/2004JA010984.pdf> 271
- [206] H. Rosenbauer, H. Grünwaldt, M.D. Montgomery, G. Paschmann, and N. Sckopke (1975): Heos 2 plasma observations in the distant polar magnetosphere: the plasma mantle, *J. Geophys. Res.* 80, 2723 87
- [207] F.S. Rowland and I.S.A. Isaksen (eds.): *The changing atmosphere*, Wiley and Sons, New York, 1988 164
- [208] M. Rycroft (Hrsg.): *The Cambridge encyclopedia of space*, Cambridge University Press, Cambridge, 1990 67, 121, 193
- [209] F.F. Sabins, Jr.: *Remote sensing – Principles and interpretation*, Freeman, 1996 21, 96, 97, 99, 101, 102, 103, 108, 111, 122, 123, 125, 140, 156, 171, 178, 179, 181, 182, 193, 197, 328, 334, 335, 347, 353
- [210] P. Sagirow: *Satellitendynamik*, BI-Hochschultaschenbücher, 1970 26, 66, 77
- [211] M. Scharfe, K. Meinzer und R. Zimmermann: Entwicklung eines magnetisch gelagerten Schwungrades für AMSAT Phase 3-D, AMSAT-DL Journal, <http://www.amsat-dl.org/journal/artikel/adlj-rad.htm> 55
- [212] H. Schönfelder: *Bildkommunikation*, Springer, Berlin, 1983 308
- [213] M. Schneider: *Satellitengeodäsie*, BI, 1988 26, 44
- [214] S.H. Schneider: Klimamodelle, *Spektrum der Wissenschaft* 7, 52, 1987 215
- [215] M.R. Schoeberl: Stratospheric ozone depletion, in [82], 1993 164
- [216] C.D. Schönwiese: *Klima im Wandel*, DVA Stuttgart, 1992 213
- [217] J. Schröter, B. Heber, F. Steinhilber, and M. B. Kallenrode: Energetic particles in the atmosphere: A Monte-Carlo simulation, *Adv. Space Res.*, 37 (8)1597-1601, 2006 266, 267, 268, 269
- [218] A. Schubert: Water takes a peculiar turn in the gulf stream, *EOS* 75, 473, 1994 184
- [219] B.E. Schutz and the GLAS Science Team: *Geoscience Laser Altimeter System GLAS – Science Requirements*, October 1997, http://www.csr.utexas.edu/glas/pdf/sci_reqs_v15.pdf
- [220] P.J. Sellers: Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration, *Int. J. remote sensing*, 12, 1113, 1985 174

- [221] G. Shakhnarovich, T. Darrell and P. Indyk: *Nearest-neighbor methods in learning and vision*, MIT Press, 2005 297
- [222] C.E. Shannon: *A mathematical theory of communication*, Bell Syst. Tech. J. 27, 379-423 und 623-656, 1948 277, 283, 292, 305
- [223] C.E. Shannon and W. Weaver: *The mathematical theory of information*, Univers. Ill. Press, Urbana, 1949 283, 287, 295, 302
- [224] C.E. Shannon and W. Weaver: *Mathematische Grundlagen der Informationstheorie*, Oldenbourg, München, 1976 281, 282, 291, 294, 325
- [225] M.J. Sidi: *Spacecraft dynamics and control – a practical engineering approach*, Cambridge University Press, 1997 54
- [226] M. Sinnhuber, J.P. Burrows, M.P. Chipperfield, C.H. Jackman, M.-B. Kallenrode, K.F. Künzi, and M. Quack: A model of the impact of magnetic field structure on atmospheric composition during solar proton events, *Geophys. Res. Lett.* **39**, 1818, doi:10.1029/2003GL017265, 2003, <http://www.sotere.uni-osnabrueck.de/pubs/paper/2003GL017265.pdf> 276
- [227] S.M. Stanley: *Earth and Life through Time*, Freeman, New York, 1989 213
- [228] K. Steinbuch: *Automat und Mensch*, Springer, Berlin, 1962 289, 296, 297, 300, 310, 325
- [229] K. Steinbuch: *Taschenbuch der Nachrichtenverarbeitung*, Springer, Berlin, 1967 325
- [230] H.L. Stiltz (ed.): *Aerospace telemetry*, Prentice-Hall, New York, 1961 295
- [231] P. Strain and F. Engle: *Portät unseres Planeten*, Westermann, Braunschweig, 1993 8, 171, 172
- [232] C.H. Strandberg: Photoarchaeology, *Photogrammetric Engineering* 33, 1152, 1967 171
- [233] C.P. Summerhayes und S.A. Thorpe: *Oceanography*, Manson, 199 142
- [234] W.H. Tait: *Radiation Detection*, Butterworth, London, 1980 232
- [235] C. Taylor: *Der Ton macht die Musik*, Vieweg, Braunschweig, 1994 296, 299
- [236] A. Tetzlaff: *Coal fire quantification using ASTER, ETM and BIRD satellite instrument data*, Universität München, http://edoc.ub.uni-muenchen.de/archive/00004398/01/tetzlaff_anke.pdf 138, 189
- [237] R.H. Thomas: Ice sheets, in [82], 1993 147
- [238] C. Timmreck: *Analyse eines Sensorkonzepts - Monte-Carlo Simulation für den Protonen und Helium Nachweis des Kieler EPHIN Instruments an Bord von SOHO*, Diplomarbeit, IFKKI, Kiel, 1991 240
- [239] G.E. Thomas: *Noctilucent clouds*, Werbevortrag, 2004 ... 84
- [240] J.R.G. Townshend, C.J. Tucker, and S.N. Goward: Global vegetation mapping, in [82], 1993 175
- [241] C.J. Tucker, B.N. Holben, and T.E. Goff: Intensive forrest clearing in Rondonia, Brazil, as detected by remote sensing, *Remote sensing of environment* 15, 255, 1984
- [242] H.F. van Beek, P. Hoyng, B. Lafleur, and G.M. Simnett: The Hard X-Ray Imaging Spectrometer (HXIS), *Solar Phys.* **65**, 39, 1980 247, 248
- [243] H. Vedel, and Xiang-Yu Huang: Impact of Ground Based GPS Data on Numerical Weather Prediction, *JMSJ*, **82**, 459-472, 2004 211
- [244] F. Vester: *Denken, lernen und vergessen*, dtv 296, 297
- [245] P.T. Verronen, Turunen E., Ulich T., and Kyrölä E., Modelling the effects of the October 1989 solar proton event on mesospheric odd nitrogen using a detailed ion and neutral chemistry model, *Ann. Geophys.* 20, 1967–1976, 2002. 269
- [246] H. Vollmers: *Modellrechnungen zur Untersuchung des Energieauflösungsvermögens und der Trennung der Teilchenart bei Messungen mit einem Detektorteleskop der Sonnen-sonde Helios*, IFKKI, Kiel, 1972 237
- [247] I. von Cube: *Kybernetische Grundlagen des Lernens*, Klett, Stuttgart, 1968 296, 297, 298, 325
- [248] P. van Oosterom, S. Zlatanova and E.M. Fendel: *Geo-Information for disaster management*, Springer, 2005 191
- [249] P. Wayner: *Compression algorithms for real programmers*, Morgan Kaufmann, 2000 325, 350

- [250] S. Webb: Reconstruction of cross-sections from transmission projections: a short simplified review and comparison of performance of algorithms, in *Physical Aspects of Medical Imaging* (eds. M. Moores, R.P. Parker and B. Pullan), Wiley, New York, 1981 160
- [251] W. Weischet: *Einführung in die allgemeine Klimatologie*, Teubner, 1988 225
- [252] R.M. White: The Great Climate Debate, *Scientific American*, **263**(1) (July), 18, 1990 215
- [253] R.C. Willson and A.V. Mordvinov: Secular total solar irradiance trend during solar cycles 21-23, *Geophys. Res. Lett.*, **30**(5), 3–6, 2003 229
- [254] H. Wittbrodt, H. Mielke, G. Narimanow, and J. Saizew: *Raumfahrt für die Erde I*, transpress VEB Verlag für Verkehrswesen, Berlin, 1975 95, 97, 107, 112
- [255] I.H. Witten, A. Moffat, and T.C. Bell: *Managing gigabytes*, Morgan Kaufmann, 1999 325, 348, 349, 350
- [256] B.E. Woodgate, E.A. Tandberg-Hansen, E.C. Brunner, J.M. Beckers, J.C. Brandt, W. Henze, C.L. Hyder, M.W. Kalet, P.J. kenny, E.D. Know, A.G. Michalitsianos, R. Rehse, R.A. Shine, and H.D. Tinsley: The ultraviolet spectrometer and polarimeter on the solar maximum mission, *Sol. Phys.* **65**, 73–90, 1980 250
- [257] D.O.A. Wolf, H.M. Hoose, and M.A. Dausers: *Die Militarisierung der Weltraums*, Bernard und Graefe, Karlsruhe, 1983 113, 278
- [258] D. Wright: Space Debris, *Physics Today*, **60**, (10)35–50, 2007, http://ptonline.aip.org/journals/doc/PHTOAD-ft/vol_60/iss_10/35_1.shtml 13, 36
- [259] D. Wright, L. Grego and L. Gronlund: *The physics of space security*, American Academy of Arts and Sciences AAAS, 2005, auch unter http://www.ucsusa.org/global_security/space_weapons/the-physics-of-space-security.html) zu finden 8, 36
- [260] H.P. Zenner and E. Zrenner: Einführung in *Physiologie der Sinne*, Spektrum - Akademischer Verlag, Heidelberg, 1994 297
- [261] F. Zimmermann und F.M. Schöttle: lage und Bahnregelung von Raumfluggeräten, Vorlesungsfolien, Uni Stuttgart, 2007 <http://www.irs.uni-stuttgart.de/skript/LBR/Lageregelung%201%20-%20LBR%20-%20WS%200708.pdf>, 8.2.2008 54
- [262] M. Zink: The TerraSAR-L Interferometric Mission Objectives, http://earth.esa.int/workshops/fringe03/participants/571/paper_TerraSAR.pdf 210
- [263] H. Zirin: *Astrophysics of the sun*, Cambridge University Press, 1988 226
- [264] R. Zirkle: *Returning to space: priorities and choices in US launch policy*, Union of Concerned Scientists, Cambridge, MA, 1987 32
- [265] US Air Force, Los Angeles Air Force Base: Global Positioning System, <http://www.losangeles.af.mil/library/factsheets/factsheet.asp?id=5325>, 8.2.2008 51
- [266] ACRIM Active Cavity radiometer Irradiance Monitor, <http://www.acrim.com/>, 20.3.2008 226
- [267] AJAX: Real Time Satellite Tracking – GPS Operational Satellites, <http://www.n2yo.com/list.php?c=20>, 23.2.2008 211
- [268] Ball http://www.ball.com/aerospace/npoes_cmis.html 154
- [269] S. Brügger und Q. Squarra: Leuchtende Nachtwolken und PMSE, http://3sky.de/NLC/PMSE/pmse_nlc.html, 23.2.2008 84
- [270] Bundesamt für Wehrtechnik und beschaffung: SAR-Lupe, <http://www.bwb.org/01DB022000000001/CurrentBaseLink/W26FTE79283INFODE>, 20.3.2008 210
- [271] M. Hennes: Der neue militärisch-industrielle Komplex in den USA, Bundeszentrale für politische Bildung, http://www.bpb.de/publikationen/U6A0BW,0,0,Der_neue_Milit%E4rischIndustrielle_Komplex_in_den_USA.html, 20.2.2008 13
- [272] Caltech, Advanced Composition Explorer, <http://www.srl.caltech.edu/ACE/> 23.2.2008 52, 68
- [273] CAWSES Homepage, Boston University, <http://www.bu.edu/causes/>, 25.2.2008 222, 260
- [274] CAWSES Deutschland Homepage, Institu für Atmosphärenphysik, Kühlungsborn, <http://www.iap-kborn.de/CAWSES.29.0.html>, 25.2.2008 222, 260

- [275] CCG: Sicherheitskritische Galileo-Anwendungen, <http://www.ccg-ev.de/details/fa/fa0405.pdf>, 20.3.2008 212
- [276] CEOS: Earth Observation Handbook, <http://iodeweb5.vliz.be/oceanteacher/resources/other/CEOSHandbook/index.html> oder <http://www.eohandbook.com/index.html>, 25.2.2008 21, 192
- [277] CIRES History, 1967–2002: remote Sensing Tools, <http://cires.colorado.edu/about/history/06a.html>, 23.2.2008 168
- [278] CLS Group: ARGOS Homepage, <http://www.argos-system.org/>, 10.3.2008 11
- [279] Colorado State University, Department of Atmospheric Science: CloudSat, <http://cloudsat.atmos.colostate.edu/>, 23.2.2008 220, 221
- [280] CNES: CALIPSO, <http://smc.cnes.fr/CALIPSO/>, 23.2.2008 220, 221
- [281] CNES: PARASOL, <http://smc.cnes.fr/PARASOL/>, 23.2.2008 220, 221
- [282] CSA: RADARSAT-1, <http://www.space.gc.ca/asc/eng/satellites/radarsat1/default.asp>, 23.2.2008 148, 154, 210
- [283] CSA: RADARSAT-2, <http://www.space.gc.ca/asc/eng/satellites/radarsat2/>, 23.2.2006 148, 154, 210
- [284] CSA: Radarsat-2 Gallery, <http://www.radarsat2.info/about/gallery/>, 11.3.2008 123
- [285] Hargrave: Aviation and Aeromodelling – interdependent evolutions and histories, http://www.ctie.monash.edu.au/hargrave/images/cody_manlifter_4_750.jpg, 7.2.2008 9
- [286] Deutsches Museum: Fernerkundungskamera MKF-6M <http://www.deutsches-museum.de/sammlungen/verkehr/raumfahrt/weltraumkamas/kamera-mkf-6/>, 10.3.2008 93
- [287] DLR http://www.caf.dlr.de/caf/aktuelles/news-archiv/bilderarchiv/gome/ozonloch2002/x_images/gome_to3_momean_antarctica.jpg 7
- [288] DLR 100 Jahre Luft- und Weltraumforschung in Deutschland: Mit Hammer und Zirkel im All, http://www.dlr.de/100Jahre/desktopdefault.aspx/tabid-2565/4432_read-8023/, 10.3.2008 93
- [289] DLR, Cluster Angewandte Fernerkundung: EnviSat, http://www.dlr.de/caf/desktopdefault.aspx/tabid-2663//4003_read-5985/, 23.2.2008 12
- [290] DLR: Galileo, http://www.dlr.de/rd/desktopdefault.aspx/tabid-2439/3577_read-5294/, 23.2.2008 212
- [291] DLR, Center for Satellite Based Crisis Information: Oil spill at the lebanese coast, http://www.zki.dlr.de/media/download/applications/2006/lebanon/DLR_200607_lebanon_oilspill_timeseries_low.jpg, 23.2.2008 183
- [292] DLR, Center for Satellite Based Crisis Information, http://www.zki.dlr.de/zki_intro_en.html, 23.2.2008 191
- [293] DLR, Mars Express, Homepage, <http://www.dlr.de/mars/>, 10.3.2008 94
- [294] DLR, Optische Systeme: Eine Weitwinkel-Stereo-Kamera für die Tiefraummission Mars-96, http://www.dlr.de/os/desktopdefault.aspx/tabid-3489/5559_read-8056/, 23.2.2008 130
- [295] DLR <http://www.caf.dlr.de/caf/satellitendaten/missionen/ikonos/> 5
- [296] DLR: TerraSAR-X, http://www.dlr.de/tsx/start_ge.htm, 23.2.2008 148, 154, 210
- [297] DLR: TerraSAR-X Mission statement, http://wwwserv2.go.t-systems-sfr.com/tsx/start_ge.htm, 23.2.2008 148, 210
- [298] DLR http://www.dlr.de/Portaldata/1/Resources/forschung_und_entwicklung/missionen/terrasar_x/terra_sydney_wel.jpg, 23.2.2008 210
- [299] DLR, Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme: TerraSAR-L, http://www.dlr.de/hr/desktopdefault.aspx/tabid-2459/3718_read-5580/, 23.2.2008 210
- [300] DLR, Institut für optische Systeme: MOMS-02, <http://www.op.dlr.de/ne-oe/fo/moms-02.html>, 10.3.2008 119

- [301] DLR, A. Eckardt, Institut für Weltraumsensorik und Planetenerkundung: Digitale Luftbildkamera ADS 40, http://www.dlr.de/os/Portaldata/48/Resources/dokumente/020906_ads.pdf, 11.3.2008 131
- [302] DLR, Optische Informationssysteme: ADS 40, http://www.dlr.de/os/desktopdefault.aspx/tabid-3489/5559_read-8076/, 11.3.2008 131
- [303] DLR, World Data Center for Remote Sensing of the Amtosphere, Homepage, <http://wdc.dlr.de/index.html>, 25.2.2008 161
- [304] DLR, World Data Center for Remote Sensing of the Amtosphere: AATSR, <http://wdc.dlr.de/sensors/aatsr/index.php>, 25.2.2008 144, 207
- [305] DLR, World Data Center for Remote Sensing of the Amtosphere: AIRS, <http://wdc.dlr.de/sensors/aatsr/index.php>, 25.2.2008 169, 219
- [306] DLR, World Data Center for Remote Sensing of the Amtosphere: AMSR, <http://wdc.dlr.de/sensors/amr/index.php>, 25.2.2008 144, 169, 219
- [307] DLR, World Data Center for Remote Sensing of the Amtosphere: AMSU <http://wdc.dlr.de/sensors/amsu/index.php>, 25.2.2008 144, 170, 219
- [308] DLR, World Data Center for Remote Sensing of the Amtosphere: AVHRR, <http://wdc.dlr.de/sensors/avhrr/index.php>, 25.2.2008 129, 204
- [309] DLR, World Data Center for Remote Sensing of the Amtosphere: AVHRR/3, <http://wdc.dlr.de/sensors/avhrr3/index.php>, 25.2.2008 129, 204
- [310] DLR, World Data Center for Remote Sensing of the Amtosphere: GOME <http://wdc.dlr.de/sensors/gome/index.php>, 25.2.2008 207
- [311] DLR, World Data Center for Remote Sensing of the Amtosphere: GOME-2, <http://wdc.dlr.de/sensors/gome2/index.php>, 25.2.2008 205, 207
- [312] DLR, World Data Center for Remote Sensing of the Amtosphere: GOMOS, <http://wdc.dlr.de/sensors/gomos/index.php>, 25.2.2008 207
- [313] DLR, World Data Center for Remote Sensing of the Amtosphere: HALOE, <http://wdc.dlr.de/sensors/haloe/index.php>, 25.2.2008
- [314] DLR, World Data Center for Remote Sensing of the Amtosphere: HIRDLS, <http://wdc.dlr.de/sensors/hirdls/index.php>, 25.2.2008 220
- [315] DLR, World Data Center for Remote Sensing of the Amtosphere: IASI, <http://wdc.dlr.de/sensors/iasi/index.php>, 19.3.2008 205
- [316] DLR, World Data Center for Remote Sensing of the Amtosphere: MERIS, <http://wdc.dlr.de/sensors/meris/index.php>, 25.2.2008 161, 169
- [317] DLR, World Data Center for Remote Sensing of the Amtosphere: MHS, <http://wdc.dlr.de/sensors/mhs/index.php>, 19.3.2008 205
- [318] DLR, World Data Center for Remote Sensing of the Amtosphere: MIPAS, <http://wdc.dlr.de/sensors/mipas/index.php>, 25.2.2008 161, 206
- [319] DLR, World Data Center for Remote Sensing of the Amtosphere: MISR, <http://wdc.dlr.de/sensors/misr/index.php>, 25.2.2008 111, 218
- [320] DLR, World Data Center for Remote Sensing of the Amtosphere: MLS, <http://wdc.dlr.de/sensors/mls/index.php>, 25.2.2008 144, 146, 220
- [321] DLR, World Data Center for Remote Sensing of the Amtosphere: MODIS, <http://wdc.dlr.de/sensors/modis/index.php>, 25.2.2008 169, 218, 219
- [322] DLR, World Data Center for Remote Sensing of the Amtosphere: MOPITT <http://wdc.dlr.de/sensors/mopitt/index.php>, 25.2.2008 163, 218
- [323] DLR, World Data Center for Remote Sensing of the Amtosphere: OMI <http://wdc.dlr.de/sensors/omi/index.php>, 25.2.2008 220
- [324] DLR, World Data Center for Remote Sensing of the Amtosphere: SBUV, <http://wdc.dlr.de/sensors/sbuvs/index.php>, 25.2.2008 161, 164
- [325] DLR, World Data Center for Remote Sensing of the Amtosphere: SCIAMACHY, <http://wdc.dlr.de/sensors/sciamachy/index.php>, 25.2.2008 161, 207
- [326] DLR, World Data Center for Remote Sensing of the Amtosphere: TES, <http://wdc.dlr.de/sensors/tes/index.php>, 25.2.2008 220

- [327] DLR, World Data Center for Remote Sensing of the Atmosphere: TOMS, <http://wdc.dlr.de/sensors/toms/index.php>, 25.2.2008 161, 164
- [328] DLR, World Data Center for Remote Sensing of the Atmosphere: VIRS, <http://wdc.dlr.de/sensors/virs/index.php>, 25.2.2008
- [329] DMC International Imaging: Earth Observation Solutions, <http://www.dmcii.com/index.html>, 23.2.2008 20, 192
- [330] EADS Astrium: All the Space you need, <http://www.astrium.eads.net/>, 23.2.2008 210
- [331] EADS Astrium: Reconnaissance satellite systems, <http://www.astrium.eads.net/families/a-safer-world/recon>, 20.3.2008 211
- [332] Electrophysics: Technology overview microbolometer detectors, http://www.electrophysics.com/View/View_TechPrimer_UncooledTutorial.asp, 13.3.2008 136
- [333] EO sharing earth observation resources: SAR Lupe constellation, http://directory.eoportal.org/d_ann.php?an_id=8343 210
- [334] ERSDAC http://www.ersdac.or.jp/ASTERimage/Image/013_Richat.jpg, 23.2.2008 190
- [335] ERSDAC http://www.ersdac.or.jp/ASTERimage/Image/023_SAF.jpg, 23.2.2008 188
- [336] ERSDAC http://www.ersdac.or.jp/ASTERimage/Image/091_Vredefort.jpg, 23.2.2008 189
- [337] ESA: Automated Transfer vehicle, <http://www.esa.int/esaMI/ATV/index.html>, 23.2.2008 39, 86
- [338] ESA: Cassini-Huygens, <http://www.esa.int/SPECIALS/Cassini-Huygens/index.html>, 5.5.2008 260
- [339] ESA Deutschland, Lokale Nachrichten: Hightech aus Deutschland: das Mars-Superauge, http://www.esa.int/esaCP/SEM5VVY5D8E_Germany_0.html, 10.3.2008 94
- [340] ESA: Mars Express, http://www.esa.int/esaMI/Mars_Express/, 10.3.2008 94
- [341] ESA Missions: AATSR Product Handbook, <http://envisat.esa.int/dataproducts/aatsr/CNTR.htm>, 23.2.2008 207
- [342] ESA Missions: ASAR Product Handbook, <http://envisat.esa.int/dataproducts/asar/CNTR.htm>, 23.2.2008 207
- [343] ESA Missions: EnviSat, <http://envisat.esa.int/>, 6.2.2008 12, 149, 205
- [344] ESA Missions: Envisat MERIS, <http://envisat.esa.int/instruments/meris/>, 23.2.2008 169, 206
- [345] ESA Missions: Envisat MWR, <http://earth.esa.int/object/index.cfm?fobjectid=3775>, 19.3.2008 206
- [346] ESA Missions: EnviSat Siamachy Data Products, <http://envisat.esa.int/instruments/sciamachy/data-app/dataprod.html>, 23.2.2008 208
- [347] ESA Missions: ERS <http://earth.esa.int/ers/>, 23.2.2008 148, 149
- [348] ESA Missions: GOMOS Product Handbook, <http://envisat.esa.int/dataproducts/gomos/CNTR.htm>, 23.2.2008 207
- [349] ESA Missions: MERIS Product Handbook, <http://envisat.esa.int/handbooks/meris/>, 23.2.2008 169, 206
- [350] ESA Missions: MERIS Product Handbook, <http://envisat.esa.int/dataproducts/meris/CNTR.htm> 206
- [351] ESA Missions: MIPAS Product Handbook, <http://envisat.esa.int/dataproducts/mipas/CNTR.htm>, 23.2.2008 206
- [352] ESA News: Let gravity assist you, http://www.esa.int/esaCP/SEMxLEOP4HD_index_0.html, 7.2.2008 35, 77
- [353] ESA Österreich, lokale Nachrichten, http://www.esa.int/esaCP/ESAF67T7YYC_Austria_1.html, 6.2.2008 12
- [354] ESA Resources: EnviSat, http://envisat.esa.int/category/index.cfm?fcategoryid=42&S_ID=14, 23.2.2008 205

- [355] ESA Science and Technology: Cluster, <http://clusterlaunch.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=8>, 23.2.2008 52
- [356] ESA Science and Technology: Giotto, <http://giotto.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=15>, 23.2.2008 121
- [357] ESA: SOHO – Solar and Heliospheric Observatory, <http://sohowww.estec.esa.nl>, 23.2.2008 68, 250
- [358] ESA Space Science: Giotto, http://www.esa.int/esaSC/120392_index_0_m.html, 23.2.2008 121
- [359] ESA: The future - Galileo, <http://www.esa.int/esaNA/galileo.html>, 8.2.2008 51, 212
- [360] ESA <http://envisat.esa.int/dataproducts/ra2-mwr/CNTR.htm>RA-2 206
- [361] ESA <http://www.estec.esa.nl/wmwww/wma/spweather/> 90
- [362] EuMetSat Home, <http://www.eumetsat.de/>, 23.2.2008 200, 201
- [363] EuMetSat: EUMETSAT Polar System (EPS), http://www.eumetsat.int/Home/Main/What_We_Do/Satellites/EUMETSAT_Polar_System/index.htm?l=en, 19.3.2008 205
- [364] EuMetSat: GMES – EUMETSAT Contributes to Global Monitoring for Environment and Security, http://www.eumetsat.int/groups/cps/documents/document/pdf_br_eum04_en.pdf, 1.3.2008 192, 211
- [365] EuMetSat (J. Schmid): The SEVERI instrument, http://www.eumetsat.int/Home/Main/Publications/Technical_and_Scientific_Documentation/repository/pdf_ten_msg_seviri_instrument, 1.3.2008 201
- [366] European Commission: FAPAR Web site, <http://fapar.jrc.it/Home.php>, 23.2.2008 174
- [367] European Space Imaging Homepage, <http://www.euspaceimaging.com/>, 23.2.2008 5, 191, 192
- [368] FAS Space Policy Project, Military Space Projects: NPOESS Convergence, <http://www.fas.org/spp/military/program/met/npoess.htm>, 23.2.2008 13, 154
- [369] FAS Space Policy Project, World Space Guide: Molniya, <http://www.fas.org/spp/guide/russia/comm/elliptical/molniya.htm>, 23.2.2008 50
- [370] FAS Space Policy Project, World Space Guide: Resurs-F, <http://www.fas.org/spp/guide/russia/earth/resursf.htm> 95
- [371] Fuchs Gruppe: MSRS Remote Sensing Satellite, http://www.fuchs-gruppe.com/eo/msrs/0_MSRS.html, 23.2.2008 118, 209
- [372] GMES Global Monitoring for Environment and Security, <http://www.gmes.info/index.php?id=home>, 23.2.2008 191
- [373] GeoCommunity – The source for earth imaging information: Sensor Description – RadarSat -1, <http://imaging.geocomm.com/features/sensor/radarsat1/>, 23.2.2008 154, 210
- [374] Geo-Eye: The GeoEye Foundation provides satellite imagery to advance research in Geographic Information Systems, Environmental Studies and Missions of Humanitarian Support, <http://www.geoeeye.com/>, 23.2.2008 5, 192, 200
- [375] Geo-Eye: Applications – National Security, <http://www.geoeeye.com/products/solutions/nationalSecurity.htm>, 23.2.2008 192
- [376] Geoforschungszentrum Potsdam, Department 1: The CHAMP Mission, http://op.gfz-potsdam.de/champ/index_CHAMP.html, 23.2.2008 88, 208
- [377] R. Hagen: Nuclear powered space missions – past and future, 11.8.1998, <http://www.space4peace.org/ianus/npsmindex.htm>, 26.2.2008 148
- [378] Hubble Site, <http://hubblesite.org/>, 23.2.2008 52
- [379] IKI: Robotic spacecraft mission to mars, http://www.iki.rssi.ru/mars96/01_mars_e.htm, 23.2.2008 130
- [380] InfoTerra – an EADS Astrium Compyna: TerraSAR-X Services, <http://www.infoterra.de/tsx/index.php>, 23.2.2008 210

- [381] Institut für Atmosphärenphysik, Kühlungsborn: NLC-Messungen mit Lidars, <http://www.iap-kborn.de/NLC-Messungen-mit-Lidars.122.0.html>, 23.2.2008 84
- [382] ISRO Indian Space research organisation, <http://www.isro.org/>, 23.2.2008 191
- [383] International Charter Space and Major Disasters, <http://www.disasterscharter.org>, 23.2.2008 191
- [384] JAXA: AMSR-E, http://sharaku.eorc.jaxa.jp/AMSR/index_e.htm, 23.2.2008 169
- [385] JAXA: Disaster Management with an Eye from Space, http://www.jaxa.jp/article/special/disaster/kozawa01_e.html, 23.2.2008 191
- [386] JAXA: about Earth Observation, <http://www.eorc.jaxa.jp/en/observation/index.html>, 25.2.2008 21, 193
- [387] JAXA: ISAS deploys solar sail film in space, <http://www.isas.jaxa.jp/e/snews/2004/0809.shtml>, 23.2.2008 67
- [388] JAXA: Yohkoh Homepage, <http://www.isas.ac.jp/home/solar/yohkoh/index.html>, 23.2.2008 53
- [389] K.C. Jezek, The Ohio State University, Byrd Polar Research Center: RadarSAT-1 Antarctic Mapping Project, <http://bprc.osu.edu/rs1/radarsat/radarsat.html>, 23.2.2008 180
- [390] K.C. Jezek, The Ohio State University, Byrd Polar Research Center: RadarSAT-1 Antarctic Mapping Project, http://bprc.osu.edu/rs1/radarsat/Images/velocity_lambert.jpg, 23.2.2008 181
- [391] Johns Hopkins University, APL Ocean Remote sensing: AVHRR Imagery, <http://fermi.jhuapl.edu/avhrr/>, 23.2.2008 129
- [392] Johns Hopkins University: New Horizons, <http://pluto.jhuapl.edu/>, 5.5.2005 260
- [393] M. Kozak: Molniya 3D satellite viewer, <http://screamyguy.net/ephemeris/viewer.htm?TITLE=Molniya>, 23.2.2008 50
- [394] K.L. Kvamme, University of Arkansas, Archeo-Imaging Lab: The archeological remote sensing library of geophysical imagery, <http://www.cast.uark.edu/~kkvamme/geop/geop.htm>, 23.2.2008 172
- [395] Leica-Geosystems, <http://gi.leica-geosystems.com/default.aspx>, 11.3.2008 131
- [396] Leica Geosystems: Leica ADS40 - Digitaler Luftbildsensor, http://www.leica-geosystems.com/corporate/de/ndef/lgs_57627.htm, 11.3.2008 131
- [397] mdacorporation: RadarSat-2 – A new era in SAR, <http://www.radarsat2.info/>, 23.2.2008 154, 210
- [398] Montana University: Satellite Images of the Keweenaw, <http://www.geo.mtu.edu/rs/keweenaw/>, 13.2.2208 126, 127, 369
- [399] NASA: CERES Clouds and the Earth's radiant Energy System, <http://science.larc.nasa.gov/ceres/index.html>, 23.2.2008 161, 218, 220
- [400] NASA: CERES Clouds and the Earth's radiant Energy System (Poster), http://science.larc.nasa.gov/ceres/press_releases/images/CERES-AQUA-poster.pdf, 23.2.2008 217
- [401] NASA: Columbia (Link to investigations report Columbia <http://www.nasa.gov/columbia/caib/html/start.html>, Challenger <http://history.nasa.gov/sts511.html>) <http://www.nasa.gov/columbia/home/index.html>, 10.3.2008 80
- [402] NASA: Experimental Communications Satellites, <http://roland.lerc.nasa.gov/~dglover/sat/satcom2.html#Echo>, 23.2.2008 35, 281
- [403] NASA: Sputnik – the fiftieth anniversary, <http://history.nasa.gov/sputnik/>, 6.2.2008 11
- [404] NASA: Terrestrial impact craters and their environmental effects, http://www.lpi.usra.edu/science/kring/epo_web/impact_cratering/intro/index.html, 7.2.2008 35
- [405] NASA: The Mariner Mars Missions, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/mars/mariner.html>, 23.2.2008 117
- [406] NASA: SHARAD Mars Shallow Subsurface Radar, <http://www.sharad.org/index.php?UserSID=>, 28.2.2008 158

- [407] NASA Ames reserach Center: Wlecome to the landSat Program, <http://geo.arc.nasa.gov/sge/landsat/landsat.html>, 23.2.2008 198
- [408] NASA Applied Sciences Program: Disaster management, <http://science.hq.nasa.gov/earth-sun/applications/theme7.htm>, 23.2.2008 191
- [409] NASA Earth Observatory <http://earthobservatory.nasa.gov/>, 10.3.2008 212, 217
- [410] NASA Earth System Science Pathfinder ESSP, <http://science.hq.nasa.gov/earth-sun/science/essp.html>, 20.3.2008 221
- [411] NASA EOS: The Earth Observing System Project Science Office, <http://eospspo.gsfc.nasa.gov/>, 23.2.2008 168, 212
- [412] NASA GES DISC: AIRS – Atmospheric InfraRed Sounder, http://daac.gsfc.nasa.gov/AIRS/documentation/hsb_instrument_guide.shtml, 23.2.2008 219
- [413] NASA GSFC, Aqua Project Science <http://aqua.nasa.gov/>, 23.2.2008 144, 169, 170, 218, 220
- [414] NASA GSFC, Aqua Project Science: AMSR-E Advanced Microwave Radiometer for EOS, http://aqua.nasa.gov/about/instrument_amsr.php, 23.2.2008 169, 219
- [415] NASA GSFC, Aqua Project Science: AMSU – Advanced Microwave Sounding Unit, http://aqua.nasa.gov/about/instrument_amsu.php, 23.2.2008 144, 170, 219
- [416] NASA GSFC, Aqua Project Science: Aqua Image Highlights, <http://aqua.nasa.gov/highlight.php?id=37>, 18.2.2008 220
- [417] NASA GSFC: Aura, <http://aura.gsfc.nasa.gov/>, 23.2.2008 144, 146, 220
- [418] NASA GSFC: Aura – Spacecraft and Instruments – HIRDLS, <http://aura.gsfc.nasa.gov/instruments/hirdls/index.html>, 23.2.2008 220
- [419] NASA GSFC: Aura – Spacecraft and Instruments – MLS, <http://aura.gsfc.nasa.gov/instruments/mls/index.html>, 23.2.2008 144, 146, 220
- [420] NASA GSFC: Aura – Spacecraft and Instruments – OMI, <http://aura.gsfc.nasa.gov/instruments/omi/index.html>, 23.2.2008 220
- [421] NASA GSFC: Aura – Spacecraft and Instruments – TES, <http://aura.gsfc.nasa.gov/instruments/tes/index.html>, 23.2.2008 220
- [422] NASA GSFC: Geoscience Laser Altimeter System GLAS, <http://glas.gsfc.nasa.gov/>, 27.6.2008 151
- [423] NASA GSFC: ICESat, <http://icesat.gsfc.nasa.gov/>, 27.2.2008 149, 151, 170
- [424] NASA GSFC: LandSat Data Continuity Mission, <http://ldcm.gsfc.nasa.gov/>, 23.2.2008 95, 122, 198
- [425] NASA GSFC: NPP NPOESS Preparatory Project, <http://jointmission.gsfc.nasa.gov/>, 23.2.2008 154
- [426] NASA GSFC: GOES POES Program, <http://goespoes.gsfc.nasa.gov/>, 6.2.2008 12, 129
- [427] NASA GSFC: POES Project – Products, <http://goespoes.gsfc.nasa.gov/poes/products/index.html>, 18.2.2008 129, 202
- [428] NASA GSFC: RHESSI Home Page, <http://hesperia.gsfc.nasa.gov/hessi/>, 23.2.2008
- [429] NASA GSFC: Solar Sail, <http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod//ap000526.html>, 23.2.2008 67
- [430] NASA GSFC: Tracking and Data Relay System TDRS, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/multi/tdrs.html>, 6.5.2008 280
- [431] NASA GSFC: TRMM – Tropical Rainfall Measuring Mission, <http://trmm.gsfc.nasa.gov/>, 23.2.2008 218
- [432] NASA GSFC: Upper Atmospheric Research Satellite UARS, <http://umpgal.gsfc.nasa.gov/>, 20.3.2008 226
- [433] NASA GSFC: Viking Mission to Mars, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/viking.html>, 5.5.2008 260
- [434] NASA GSFC: Wind – Understanding Interplanetary Dynamics, <http://pwg.gsfc.nasa.gov/wind.shtml>, 23.2.2008 52

- [435] NASA GSFC Geospace Physics Laboratory <http://hpb.gsfc.nasa.gov/>, 2.5.2008; Abb. 5.16 von <http://hpb.gsfc.nasa.gov/images/LWS-geospace-IT.jpg> 242
- [436] NASA GSFC International Laser Ranging Service: SLR Satellite Information, http://ilrs.gsfc.nasa.gov/satellite_missions/slr_sats.html, 10.3.2008 35
- [437] NASA GSFC Scientific Visualization Studio: LandSat witnesses the descrutcztion of the mesopotamian ecosystem, <http://svs.gsfc.nasa.gov/vis/a000000/a002200/a002210/index.html>, 23.2.2008 178
- [438] NASA GSFC Wilkinson Microwave Anisotropy Probe WMAP: Lagrange points, http://map.gsfc.nasa.gov/mission/observatory_12.html, 10.3.2008 71
- [439] NASA GSFC and Smithsonian Astrophysical Observatory, Observatories: Compton Gamma-Ray Observatory (CGRO), <http://heasarc.nasa.gov/docs/cgro/cgro.html>, 23.2.2008 53
- [440] NASA GSFC and Smithsonian Astrophysical Observatory, Observatories: ISEE-3/ICE, <http://heasarc.nasa.gov/docs/heasarc/missions/isee3.html>, 23.2.2008 52, 55, 68, 256
- [441] NASA GSFC and Smithsonian Astrophysical Observatory, Observatories: P78-1, <http://heasarc.nasa.gov/docs/heasarc/missions/p78-1.html>, 6.2.2008 8, 52
- [442] NASA GSFC and Smithsonian Astrophysical Observatory, Observatories: Solar Maximum Mission SMM, <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/heasarc/missions/solarmax.html>, 23.2.2008 40, 224, 246, 250
- [443] NASA Heliophysics: The new science of the sun-solar system connections, <http://sec.gsfc.nasa.gov/>, 23.2.2008 90
- [444] NASA History Division: Mariner Space probes, <http://history.nasa.gov/mariner.html>, 23.2.2008 117
- [445] NASA History Division: Space Applications, <http://history.nasa.gov/SP-4012/vol13/ch4.htm>, 1.3.2008 202
- [446] NASA History Division: Exploring the Heavens, <http://history.nasa.gov/SP-4312/ch4.htm>, 10.3.2008 40
- [447] NASA Human Spaceflight: International Space Station, <http://spaceflight.nasa.gov/station/index.html>, 23.2.2008 13
- [448] NASA JHUAPL: Messenger, <http://messenger.jhuapl.edu/>, 5.5.2008 260
- [449] NASA JPL: ACRIMSAT, <http://acrim.jpl.nasa.gov/>, 20.3.2008 226
- [450] NASA JPL: AIRS – Atmospheric Infrared Sounder, <http://www-airs.jpl.nasa.gov/>, 23.2.2008 169, 219
- [451] NASA JPL: ASTER – Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, <http://asterweb.jpl.nasa.gov/>, 23.2.2008 169, 218
- [452] NASA JPL: Aster – Gallery – Aletsch, <http://asterweb.jpl.nasa.gov/gallery/images/aletsch.jpg>, 23.2.2008 216
- [453] NASA JPL: Cassini-Huygens – A quick gravity-assist primer, <http://saturn.jpl.nasa.gov/mission/gravity-assist-primer.cfm>, 23.2.2008 74, 77
- [454] NASA JPL: Cassini-Huygens – Mission to Saturn & Titan, <http://saturn.jpl.nasa.gov/home/index.cfm>, 23.2.2008 77, 158, 260
- [455] NASA JPL: Cassini-Huygens – Spacecraft Safety, <http://saturn.jpl.nasa.gov/spacecraft/safety.cfm>, 23.2.2008 92
- [456] NASA JPL: Cryocooler Program Summary, http://www.jpl.nasa.gov/adv_tech/coolers/summary.htm, 23.2.2008 135
- [457] NASA JPL: Galileo – Journey to Jupiter, <http://www2.jpl.nasa.gov/galileo/>, 23.2.2008 63, 77
- [458] NASA JPL: Galileo – The Galileo Tour Guide, Chap. 2, <http://www2.jpl.nasa.gov/galileo/tour/2TOUR.pdf>, 23.2.2008
- [459] NASA JPL: Genesis – search for the origins, <http://genesismission.jpl.nasa.gov/>, 23.2.2008 12
- [460] NASA JPL: Genesis – Gallery – genesis Sample Recovery Photo Images, <http://genesismission.jpl.nasa.gov/mission/recgallery.html>, 23.2.2008 12, 278

- [461] NASA JPL: Helios 1A, 1B, <http://leonardo.jpl.nasa.gov/msl/QuickLooks/helios1a1bQL.html>, 20.3.2008 211
- [462] NASA JPL: Improved TIROS Operational System ITOS, <http://msl.jpl.nasa.gov/QuickLooks/itosQL.html>, 1.3.2008 204
- [463] NASA JPL: Magellan Mission to Venus, <http://www2.jpl.nasa.gov/magellan/>, 26.2.2008 148, 158, 260
- [464] NASA JPL: Mars Reconnaissance Orbiter (MRO), <http://mars.jpl.nasa.gov/mro/>, 28.2.2008 158
- [465] NASA JPL: MISR – Multi-Angle Imaging Spectrometer, <http://www-misr.jpl.nasa.gov/>, 23.2.2008 111, 218
- [466] NASA JPL: MISR – Multi-Angle Imaging Spectrometer – The MISR Instrument: Introduction, <http://www-misr.jpl.nasa.gov/mission/minst.html>, 23.2.2008 111, 218
- [467] NASA JPL: OCO Orbiting Carbon Observatory, <http://oco.jpl.nasa.gov/>, 23.2.2008 161, 220, 221
- [468] NASA JPL: SIR-C/X-SAR – Space radar Images of Earth, <http://www.jpl.nasa.gov/radar/sircxsar/>, 23.2.2008 172
- [469] NASA JPL: THEMIS: The Thermal Emission Imaging System, <http://mars.jpl.nasa.gov/odyssey/technology/themis.html>, 25.2.2008 139
- [470] NASA JPL: TIROS, <http://msl.jpl.nasa.gov/QuickLooks/tirosQL.html>, 1.3.2008 202
- [471] NASA JPL: TOS, <http://msl.jpl.nasa.gov/QuickLooks/tosQL.html>, 1.3.2008 204
- [472] NASA JPL: Ubar ptical/Radar (enlarged figure), <http://photojournal.jpl.nasa.gov/jpeg/PIA01302.jpg> 171
- [473] NASA JPL: Ubar ptical/Radar, <http://www.jpl.nasa.gov/radar/sircxsar/ubar1.html>, 23.2.2008 171
- [474] NASA JPL: Ulysses, <http://ulysses.jpl.nasa.gov/>, 23.2.2008 63, 76, 256
- [475] NASA JPL: Vidicon, <http://www2.jpl.nasa.gov/basics/vidicon.gif>, 23.2.2008 115
- [476] NASA JPL: Voyager, <http://voyager.jpl.nasa.gov/>, 23.2.2008 55, 74, 76, 117, 256
- [477] NASA JPL, Ocean Surface Topography from Space: Jason-1, <http://topex-www.jpl.nasa.gov/mission/jason-1.html>, 26.2.2008 149, 151
- [478] NASA JPL, Ocean Surface Topography from Space: TOPEX/Poseidon, <http://topex-www.jpl.nasa.gov/mission/topex.html>, 26.2.2008 151
- [479] NASA JPL, Past Missions: SeaSat, <http://www.jpl.nasa.gov/missions/past/seasat.html>, 23.2.2008 148, 149
- [480] NASA JPL, Winds – Measuring Ocean Winds from Space: Missions – NSCAT, <http://winds.jpl.nasa.gov/missions/nscat/index.cfm>, 23.2.2008
- [481] NASA JPL, Winds – Measuring Ocean Winds from Space: Missions – SeaWind on QuikSCAT, <http://winds.jpl.nasa.gov/missions/quikscat/>, 23.2.2008 153
- [482] NASA Kennedy Sapce Center: SkyLab, <http://www-pao.ksc.nasa.gov/history/skylab/skylab.htm>, 23.2.2008 12, 40, 149, 250
- [483] NASA LandSat: The LandSat Program, <http://landsat.gsfc.nasa.gov/>, 6.2.2008 12
- [484] NASA LandSat: LandSat 6, <http://landsat.gsfc.nasa.gov/about/landsat6.html>, 23.2.2008
- [485] NASA LandSat: LandSat 7, <http://landsat.gsfc.nasa.gov/about/landsat7.html>, 23.2.2008 199
- [486] NASA LandSat: The Enhanced Thematic Mapper, <http://landsat.gsfc.nasa.gov/about/etm.html>, 23.2.2008 128, 199
- [487] NASA LandSat Images: Aral Sea, http://veimages.gsfc.nasa.gov/1723/landsat_aral_triptych_lrg.jpg, 23.2.2008 177
- [488] NASA Marshall Space Flight Center: AMSR-E, <http://wwwghcc.msfc.nasa.gov/AMSR/>, 23.2.2008 144, 219

- [489] NASA Marshall Spaceflight Center: Visible Infrared Spin-Scan Radiometer Instrument Document, http://ghrc.msfc.nasa.gov:5721/sensor_documents/visssr_sensor.html, 1.3.2008 201
- [490] NASA Marshall Space Flight Center, Solar Physics: The Solar Maximum Mission, <http://solarscience.msfc.nasa.gov/SMM.shtml>, 23.2.2008 40, 224, 246, 250
- [491] NASA Mission and Spacecraft Library: Echo 1, 1A, 2, <http://samadhi.jpl.nasa.gov/msl/QuickLooks/echoQL.html>, 23.2.2008 35, 281
- [492] NASA Mission and Spacecraft Library: GRO – Compton Gamma-Ray Observatory, <http://msl.jpl.nasa.gov/QuickLooks/groQL.html>, 23.2.2008 53
- [493] NASA Mission and Spacecraft Library: SMM, <http://leonardo.jpl.nasa.gov/msl/QuickLooks/smmQL.html>, 23.2.2008 40, 52, 224, 226, 246, 250
- [494] NASA Missions: A-Train, http://www.nasa.gov/images/content/112931main_a-train.jpg, 23.2.2008 144, 220
- [495] NASA Missions: CloudSat, http://www.nasa.gov/mission_pages/cloudsat/main/index.html, 23.2.2008 220, 221
- [496] NASA Missions: International Space Station, http://www.nasa.gov/mission_pages/station/main/index.html, 23.2.2008 13
- [497] NASA Missions: Mars Reconnaissance Orbiter (MRO), http://www.nasa.gov/mission_pages/MRO/main/index.html, 28.2.2008 158
- [498] NASA Missions: New Horizon, http://www.nasa.gov/mission_pages/newhorizons/main/index.html, 5.5.2008 260
- [499] NASA Missions: Pioneer, http://www.nasa.gov/mission_pages/pioneer/, 23.2.2008 55, 74, 76, 256
- [500] NASA Missions: Stereo – Studying the Sun in 3D, http://www.nasa.gov/mission_pages/stereo/main/index.html 69, 250
- [501] NASA Missions: Viking, http://www.nasa.gov/mission_pages/viking/, 23.2.2008 117
- [502] NASA MODIS Web, Home, <http://modis.gsfc.nasa.gov/>, 23.2.2008 169, 218, 219
- [503] NASA News and Features: As world turns its drag in space and time, http://www.nasa.gov/vision/earth/lookingatearth/earth_drag.html, 23.2.2008 33
- [504] NASA News and Features: Solar sails could send spacecraft sailing through space, http://www.nasa.gov/vision/universe/roboticexplorers/solar_sails.html, 23.2.2008 67
- [505] NASA NSSDC Master catalog, Main, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/SpacecraftQuery.jsp>, 15.3.2008 145, 163, 193, 255
- [506] NASA NSSDC Master Catalog: Advanced Vidicon Camera System, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1970-008A-04>, 1.3.2008 94, 204
- [507] NASA NSSDC Master Catalog: Coastal Zone Color Scanner CZCS, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1978-098A-03>, 18.3.2008 186
- [508] NASA NSSDC Master catalog: Coriolis, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=2003-001A>, 26.2.2008 154
- [509] NASA NSSDC Master Catalog: COSMOS 243 (und Microwave Radiometer), <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1968-080A>, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1968-080A-01> 15.3.2008 144
- [510] NASA NSSDC Master Catalog: COSMOS 1500, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/masterCatalog.do?sc=1983-099A>, 26.2.2008 148, 155
- [511] NASA NSSDC Master Catalog: DMSP 4A/F1, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1966-082A>, 10.3.2008 94
- [512] NASA NSSDC Master Catalog: Dual Vidicon Camera, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1969-029A-01>, 10.3.2008 94
- [513] NASA NSSDC Master Catalog: Earth radiation Budget Experiment (ERBE), <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1986-073A-05> 204
- [514] NASA NSSDC Master Catalog: Earth radiation Budget Satellite (ERBS), <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1984-108B> 224

- [515] NASA NSSDC Master Catalog: Electrically Scanning Microwave Radiometer (ESMR), <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1972-097A-04>, 25.2.2008 144
- [516] NASA NSSDC Master Catalog: Enhanced Thematic Mapper LandSat Plus 7, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1999-020A-01>, 11.3.2008 122, 128, 199
- [517] NASA NSSDC Master Catalog: ESSA 1, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1966-008A>, 10.3.2008 94
- [518] NASA NSSDC Master Catalog: ESSA 3, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1966-087A>, 19.3.2008 204
- [519] NASA NSSDC Master Catalog: Explorer 6, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/masterCatalog.do?sc=1959-004A>, 10.3.2008 93
- [520] NASA NSSDC Master Catalog: Flat Plate Radiometer, FPR, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1966-087A-02>, 19.3.2008 204, 222
- [521] NASA NSSDC Master Catalog: Geodynamics Experimental Ocean Satellite GEOS 3, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/masterCatalog.do?sc=1975-027A>, 26.2.2008 149
- [522] NASA NSSDC Master Catalog: HCMM, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/masterCatalog.do?sc=1978-041A>, 25.2.2008 137, 169
- [523] NASA NSSDC Master Catalog: Helios-A, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1974-097A>, 23.2.2008 55, 256
- [524] NASA NSSDC Master Catalog: Helios-B, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1976-003A>, 23.2.2008 55, 256
- [525] NASA NSSDC Master Catalog: High Resolution Multispectral Stereo Imager (HRM-SI), <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1999-020A-02>, 11.3.2008 200
- [526] NASA NSSDC Master Catalog: High resolution Visible Imager Spot 1, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1986-019A-01>, 11.3.2008 119
- [527] NASA NSSDC Master Catalog: High resolution Visible Imager Spot 2, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1990-005A-01>, 11.3.2008 119
- [528] NASA NSSDC Master Catalog: HST Hubble Space Telescope, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/masterCatalog.do?sc=1990-037B>, 23.2.2008 52
- [529] NASA NSSDC Master Catalog: IMP-J (Interplanetary Monitoring Platform 8, Explorer 50), <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/masterCatalog.do?sc=1973-078A>, 23.2.2008 52
- [530] NASA NSSDC Master Catalog: ISEE 1 (Internationals Sun–Earth Explorer 1), <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/masterCatalog.do?sc=1977-102A>, 23.2.2008 52, 256
- [531] NASA NSSDC Master Catalog: ISEE 2 (Internationals Sun–Earth Explorer 2), <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1977-102B> 52, 256
- [532] NASA NSSDC Master Catalog: LAGEOS, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/masterCatalog.do?sc=1976-039A>, 23.2.2008 33, 149
- [533] NASA NSSDC Master Catalog: LAGEOS II, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/masterCatalog.do?sc=1992-070B>, 23.2.2008 33
- [534] NASA NSSDC Master Catalog: LandSat 1, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1972-058A>, 10.3.2008 94, 116, 122, 199
- [535] NASA NSSDC Master Catalog: LandSat 2, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1975-004A>, 10.3.2008 94, 116, 122, 199
- [536] NASA NSSDC Master Catalog: LandSat 3, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1978-026A>, 10.3.2008 94, 116, 122, 199
- [537] NASA NSSDC Master Catalog: LandSat 4, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1982-072A>, 10.3.2008 122, 123, 199
- [538] NASA NSSDC Master Catalog: LandSat 5, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1984-021A>, 10.3.2008 95, 122, 123, 199

- [539] NASA NSSDC Master Catalog: LandSat 7, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1999-020A>, 10.3.2008 199
- [540] NASA NSSDC Master Catalog: Magellan, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1989-033B>, 26.2.2008 148, 158, 260
- [541] NASA NSSDC Master Catalog: Mariner 2, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/masterCatalog.do?sc=1962-041A>, 25.2.2008 117, 144, 260
- [542] NASA NSSDC Master Catalog: Mariner 4, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/masterCatalog.do?sc=1964-077A>, 5.5.2008 260
- [543] NASA NSSDC Master Catalog: Mars 1, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1962-061A>, 5.5.2008 260
- [544] NASA NSSDC Master Catalog: Measurement of Air Pollution from Satellites (MAPS), <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1981-111A-04>, 18.3.2008
- [545] NASA NSSDC Master Catalog: Measurement of Air Pollution from Satellites (MAPS), <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1994-020A-03>, 18.3.2008 163
- [546] NASA NSSDC Master Catalog: Measurement of Air Pollution from Satellites (MAPS), <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1981-111A-04>, 18.3.2008 163
- [547] NASA NSSDC Master Catalog: Metop-A, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=2006-044A>, 19.3.2008
- [548] NASA NSSDC Master Catalog: Meteor 1, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1969-029A>, 10.3.2008 94
- [549] NASA NSSDC Master Catalog: Microwave Spectrometer (NEMS), <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1972-097A-03>, 25.2.2008 144
- [550] NASA NSSDC Master Catalog: Molniya 1-4, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/masterCatalog.do?sc=1966-092A>, 23.2.2008 50
- [551] NASA NSSDC Master Catalog: Modular Optoelectronic Multispectral Stereo Scanner MOMS-02, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=SPLABD2%20%20-13>, 10.3.2008 119
- [552] NASA NSSDC Master catalog: Multispectral Scanner MSS LandSat 1, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1972-058A-02>, 10.3.2008 94, 122, 199
- [553] NASA NSSDC Master catalog: Multispectral Scanner MSS LandSat 2, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1975-004A-02>, 10.3.2008 94, 122
- [554] NASA NSSDC Master catalog: Multispectral Scanner MSS LandSat 3, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1978-026A-02>, 10.3.2008 94, 122
- [555] NASA NSSDC Master catalog: Multispectral Scanner MSS LandSat 4, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1982-072A-02>, 10.3.2008 94, 122
- [556] NASA NSSDC Master catalog: Multispectral Scanner MSS LandSat 5, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1984-021A-02>, 10.3.2008 94, 122
- [557] NASA NSSDC Master Catalog: Nimbus 5, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/masterCatalog.do?sc=1972-097A>, 25.2.2008 144
- [558] NASA NSSDC Master Catalog: Nimbus 7, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1978-098A>, 25.2.2008 138, 143, 186, 224
- [559] NASA NSSDC Master Catalog: NOAA 13 (POES 13), <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1993-050A>, 11.3.2008 129
- [560] NASA NSSDC Master Catalog: NOAA 14 (POES 14), <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1994-089A>, 11.3.2008 129
- [561] NASA NSSDC Master Catalog: NOAA 15 (POES 15), <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1998-030A>, 11.3.2008 129
- [562] NASA NSSDC Master Catalog: NOAA 16 (POES 16), <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=2000-055A>, 11.3.2008 129

- [563] NASA NSSDC Master Catalog: Resurs F <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1989-038A>, 10.3.2008 95
- [564] NASA NSSDC Master Catalog: Resurs F-1M <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1999-054A>, 10.3.2008 95
- [565] NASA NSSDC Master Catalog: Return Beam Vidicon Camera System LandSat 1, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1972-058A-01>, 10.3.2007 94, 116, 199
- [566] NASA NSSDC Master Catalog: Return Beam Vidicon Camera System LandSat 2, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1975-004A-01>, 10.3.2007 94, 116
- [567] NASA NSSDC Master Catalog: Return Beam Vidicon Camera System LandSat 3, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1978-026A-01>, 10.3.2007 94, 116, 199
- [568] NASA NSSDC Master Catalog: Scanning Multispectral Microwave Radiometer SMMR, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1978-098A-08>, 25.2.2008 143
- [569] NASA NSSDC Master Catalog: Scanning Radiometer (TIROS), <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1960-016A-02>, 19.3.2008 203
- [570] NASA NSSDC Master Catalog: Scanning Radiometer (NOAA), <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1970-106A-03>, 19.3.2008 204
- [571] NASA NSSDC Master Catalog: Seasat 1, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/masterCatalog.do?sc=1978-064A>, 23.2.2008 148, 149
- [572] NASA NSSDC Master Catalog: Shuttle Imaging Radar-A (SIR-A), <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1981-111A-01>, 26.2.2008 148
- [573] NASA NSSDC Master Catalog: Shuttle Imaging Radar-B (SIR-B), <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1984-108A-01>, 26.2.2008
- [574] NASA NSSDC Master Catalog: Shuttle Imaging Radar-C (SIR-C/X-SAR), <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1994-020A-01>, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1994-020A-02> 26.2.2008 148, 171
- [575] NASA NSSDC Master Catalog: Side-Looking Real Aperature Radar (SLRAR), <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1983-099A-01>, 26.2.2008 148
- [576] NASA NSSDC Master Catalog: Solar Proton Monitoring Experiment, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1970-106A-01>, 19.3.2008 204
- [577] NASA NSSDC Master Catalog: Space Environment Monitor (SEM), <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1991-032A-04>, 19.3.2008 204, 222, 232
- [578] NASA NSSDC Master Catalog: SPOT 1, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1986-019A>, 11.3.2008 119
- [579] NASA NSSDC Master Catalog: SPOT 2, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1990-005A>, 11.3.2008 119
- [580] NASA NSSDC Master Catalog: SPOT 3, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1993-061A>, 11.3.2008 119
- [581] NASA NSSDC Master Catalog: SPOT 4, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1998-017A>, 11.3.2008 119
- [582] NASA NSSDC Master Catalog: SPOT 5, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=2002-021A>, 11.3.2008
- [583] NASA NSSDC Master Catalog: STS-2, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/masterCatalog.do?sc=1981-111A>, 26.2.2008 148
- [584] NASA NSSDC Master Catalog: STS-41G (STS-13), <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1984-108A>, 26.2.2008
- [585] NASA NSSDC Master Catalog: STS-59/SRL 1, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/masterCatalog.do?sc=1994-020A>, 26.2.2008 148

- [586] NASA NSSDC Master Catalog: Syncom 2, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/masterCatalog.do?sc=1963-031A>, 23.2.2008 55
- [587] NASA NSSDC Master Catalog: Temperature/Humidity Infrared Spectrometer THIR, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1978-098A-10>, 25.2.2008 138
- [588] NASA NSSDC Master Catalog: TIROS 1, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/masterCatalog.do?sc=1960-002B>, 23.2.2008 94, 202
- [589] NASA NSSDC Master Catalog: TIROS Operational Vertical Sounder, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1986-073A-02>, 19.3.2008 204
- [590] NASA NSSDC Master Catalog: TIROS 1 Television Camera System, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1960-002B-01>, 10.3.2008 94
- [591] NASA NSSDC Master Catalog: TIROS 9, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1965-004A>, 8.2.2008 55, 202
- [592] NASA NSSDC Master Catalog: TIROS N, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1978-096A>, 11.3.2008 129
- [593] NASA NSSDC Master Catalog: Thematic Mapper LandSat 4, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1982-072A-01>, 11.3.2008 122, 123, 199
- [594] NASA NSSDC Master Catalog: Thematic Mapper LandSat 5, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1984-021A-01>, 11.3.2008 122, 123, 199
- [595] NASA NSSDC Master Catalog: TV Optical Scanner, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1959-004A-05>, 10.3.2008 93
- [596] NASA NSSDC Master Catalog: Venera 1, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/masterCatalog.do?sc=1961-003A>, 5.5.2008 260
- [597] NASA NSSDC Master Catalog: Venera 3, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/masterCatalog.do?sc=1965-092A>, 5.5.2008 260
- [598] NASA NSSDC Master Catalog: Venera 4, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/masterCatalog.do?sc=1967-058A>, 5.5.2008 260
- [599] NASA NSSDC Master Catalog: Venera 5, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/masterCatalog.do?sc=1969-001A>, 5.5.2008 260
- [600] NASA NSSDC Master Matalog: Very High Resolution Radiometer (VHRR), <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1972-082A-03>, 19.3.2008 204
- [601] NASA NSSDC master catalog: Vidicon Camera System, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1966-082A-01>, 10.3.2008 94
- [602] NASA NSSDC Master Catalog: Viking 1 Lander, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/masterCatalog.do?sc=1975-075C>, 23.2.2008 117
- [603] NASA NSSDC Master Catalog: Viking Sweden, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/masterCatalog.do?sc=1986-019B>, 2.5.2008 243
- [604] NASA NSSDC Master Catalog: Yohkoh, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/masterCatalog.do?sc=1991-062A>, 23.2.2008 53
- [605] NASA Orbital Debris Program Office: Orbital Debris, <http://www.orbitaldebris.jsc.nasa.gov/>, 21.2.2008 36
- [606] NASA Orbital Debris Program Office: Orbital Debris – Photo Gallery, <http://www.orbitaldebris.jsc.nasa.gov/photogallery/photogallery.html>, 21.2.2008 36
- [607] NASA Remote Sensing Tutorial, Homepage. <http://rst.gsfc.nasa.gov/start.html>, 25.2.2008 21
- [608] NASA Remote Sensing Tutorial: The Heat Capacity Mapping Mission, http://rst.gsfc.nasa.gov/Sect9/Sect9_8.html, 25.2.2008 137, 169
- [609] NASA Remote Sensing Tutotrial: Military Intelligence Satellites, http://rst.gsfc.nasa.gov/Intro/Part2_26e.html, 23.2.2008 93
- [610] NASA Science at NASA: The Phantom Torso, http://science.nasa.gov/headlines/y2001/ast04may_1.htm, 11.2.2008 89
- [611] NASA Science Mission Directorate, http://www.earth.nasa.gov/flash_top.html, 23.2.2008 168, 212

- [612] NASA Science Missions: NPOESS preparatory project, http://science.hq.nasa.gov/missions/satellite_58.htm, 23.2.2008 154
- [613] NASA SOHO: SOHO – Solar and heliospheric Observatory, <http://sohowww.nascom.nasa.gov/>, 23.2.2008 52, 68, 250
- [614] NASA SOHO: Solar–Terrestrial Relationships <http://sohowww.nascom.nasa.gov/gallery/images/large/tricompw.jpg>, 23.2.2008 89
- [615] NASA Space Warn Bulletins: Overview, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/spacewarn/>, 23.2.2008 14, 193, 279
- [616] NASA SpaceWarn Bulletin 591, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/spacewarn/spx591.html>, 23.2.2008
- [617] NASA Terra: Terra – the EOS Flagship, <http://terra.nasa.gov/>, 23.2.2008 111, 163, 169, 217, 218, 219
- [618] NASA Thermo-mechanical Systems Branch: Stirling, <http://www.grc.nasa.gov/WWW/tmsb/stirling.html>, 23.2.2008 135
- [619] NASA Visible Earth, Homepage, <http://visibleearth.nasa.gov/>, 25.2.2008 5, 21
- [620] NASA Visible Earth: Aster, http://visibleearth.nasa.gov/view_set.php?sensorName=ASTER, 23.2.2008 218
- [621] NASA Visible Earth: Ocean Features from Seasat, http://visibleearth.nasa.gov/view_rec.php?id=16499, 26.2.2008 149
- [622] NASA Visible Earth: Space Radar Image of Kiluchevskoi, Volcano, Russia, http://visibleearth.nasa.gov/view_rec.php?id=432, 26.2.2008 148
- [623] NASA and USRA: Earth Science Pictures of the Day, <http://epod.usra.edu/archive/images/nlcfb230605.jpeg>, 23.2.2008 84
- [624] NASA <http://aqua.nasa.gov/AMSU3.html> 170, 219
- [625] NASA <http://www-calipso.larc.nasa.gov/> 220, 221
- [626] NASA <http://www-calipso.larc.nasa.gov/about/payload.php#CALIOP> 221
- [627] NASA <http://southport.jpl.nasa.gov/nrc/fig5.10.gif> 156
- [628] NASA <http://icesat.gsfc.nasa.gov/12538-r10.pdf>
- [629] NASA <http://www.sel.noaa.gov/index.html> 90
- [630] NASA <http://southport.jpl.nasa.gov/> 154
- [631] National Geographic: First Mars Avalanches Seen In Action, <http://news.nationalgeographic.com/news/2008/03/080303-mars-avalanche.html>, 18.3.2008 181
- [632] National Reconnaissance Office: CORONA <http://www.nro.gov/corona/facts.html>, 10.3.2008 93
- [633] National Security Archive Electronic Briefing Book # 13: U.S. Satellite Imagery, 1960–1999, by J.T. Richelson, <http://www.gwu.edu/%7Eensarchiv/NSAEBB/NSAEBB13/>, 10.3.2008 93
- [634] NDVI Central: A continuous NDVI Record, <http://www.ndvicentral.info/>, 23.2.2008 174, 176
- [635] New Scientist Space, V. Kiernan: NASA shrugs off plutonium risk, 29.10.1994, <http://space.newscientist.com/channel/solar-system/cassini-huygens/mg14419490.900>, 23.2.2008 92
- [636] NOAA NGDC: UARS/ACRIM II Total Solar Irradiance Measurements, <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/IRRADIANCE/uars.html>, 20.3.2008 226
- [637] NOAA Satellite and Information Service: NOAA KLM User Guide, 3.1 Advanced Very High Resolution Radiometer/3, <http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/klm/html/c3/sec3-1.htm>, 23.2.2008 129, 204
- [638] NOAA Satellite and Information Service: Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR, <http://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/ml/avhrr.html>, 23.2.2008 129, 204
- [639] NOAA Satellite and Information Service: NPOESS – National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System, <http://www.ipo.noaa.gov/>, 23.2.2008 154
- [640] NOAA Satellite and Information Service: Polar orbiting Satellites, <http://www.oso.noaa.gov/poes/>, 6.2.2008 12, 154

- [641] NOAA Satellite and Information Service: Polar Navigation/Earth Location, <http://www.osdpd.noaa.gov/PSB/NAVIGATION/navpage.html>, 7.2.2008 48
- [642] NOAA National Weather Service: Space Weather Prediction Center, <http://www.spaceweather.noaa.gov/>, 23.2.2008 90
- [643] NRL: Project Web Sites for the WindSat Archives, <http://windsat.pxi.com>, 23.2.2008 154
- [644] NSIDC: AMSR-E Instrument Description, http://nsidc.org/data/docs/daac/amsre_instrument.gd.html, 23.2.2008 169
- [645] NSIDC: Seasat, http://nsidc.org/data/docs/daac/seasat_platform.gd.html, 23.2.2008 148
- [646] NZZ online: Auf eigene Rechnung in den Weltraum, http://www.nzz.ch/nachrichten/wissenschaft/auf_eigene_rechnung_in_den_weltraum_1.687461.html, 12.3.2008 14
- [647] NZZ online: Die US-Pläne für den Abschuss eines Satelliten, http://www.nzz.ch/nachrichten/international/die_us-plaene_fuer_den_abschuss_eines_satelliten_1.673720.html, 19.2.2008 13, 36, 45
- [648] NZZ online: USA bringen Schiff für Satellitenabschuss in Stellung, http://www.nzz.ch/nachrichten/panorama/usa_bringen_schiff_fuer_satellitenabschuss_in_stellung__1.674756.html, 20.2.2008 8, 45
- [649] NZZ online: Gefährlicher Satellit mit Rakete abgeschossen, http://www.nzz.ch/nachrichten/panorama/gefaehrlicher_satellit_mit_rakete_abgeschossen__1.675421.html, 21.2.2008 45
- [650] NZZ online: Iran sucht die technologische Unabhängigkeit, http://www.nzz.ch/nachrichten/international/iran_sucht_die_technologische_unabhaengigkeit_1.675219.html, 21.2.2008 13
- [651] OHB Systems: SAR Lupe, <http://www.ohb-system.de/Satellites/Missions/sarlupe.html>, 20.3.2008, sowie die Werbebroschüre unter <http://www.ohb-system.de/pdf/sar-lupe-broschure.pdf> 210
- [652] ORF: Chinas "langer Marsch" zum Mond beginnt, 24.10.2007, <http://science.orf.at/science/news/149882> 13
- [653] Oxford Instruments: Hi-Technology Tools and Systems, <http://www.oxford-instruments.com/>, 23.2.2008 135
- [654] Raytheon Homepage, <http://www.raytheon.com/>, 13.3.2008 136
- [655] Raytheon: Thermal emission imaging system (THEMIS), http://www.raytheon.com/products/stellent/groups/sas/documents/legacy_site/cms01_047045.pdf, 25.2.2008 130, 139
- [656] Reuters: U.S. has high confidence it hit the fuel tank, <http://www.reuters.com/article/domesticNews/idUSN1930844420080221>, 23.2.2008 45
- [657] RISK-EOS Homepage, <http://www.risk-eos.com/actus/pge/index.php?arbo=0> 191
- [658] Russian Space Agency, Information Analytical Center: GLONASS, <http://www.glonass-ianc.rsa.ru/pls/htmldb/f?p=201:1:8526123244341633081>, 23.2.2008 212
- [659] Russian Space Web: MIR <http://www.russianspaceweb.com/mir.html> 12
- [660] Rutherford Appleton Lab: Geostationary Earth Radiation Budget Experiment, <http://www.ssd.rl.ac.uk/gerb/>, 1.3.2008 201
- [661] Satellite Imaging Corporation: Aster satellite sensor images – Mt. St. Helens, <http://www.satimagingcorp.com/galleryimages/aster-msh-march15.jpg>, 23.2.2008 216
- [662] Satellite Imaging Corporation: Aster Satellite Sensor Images, <http://www.satimagingcorp.com/gallery-aster.html>, 23.2.2008 218
- [663] Satellite Imaging Corporation: Ikonos San Francisco, <http://www.satimagingcorp.com/galleryimages/ikonos-san-francisco-california.jpg>, 23.2.2008 201
- [664] Satellite Imaging Corporation: Envision your world, <http://www.satimagingcorp.com/index.html>, 23.2.2008 5, 192

- [665] Satellite Imaging Corporation: Ikonos satellite images of ancient observatories, <http://www.satimagingcorp.com/gallery-ancient-observatories.html>, 23.2.2008 172
- [666] Satellite Imaging Corporation: Mineral exploration and mining, <http://www.satimagingcorp.com/svc/mining.html>, 23.2.2008 179
- [667] Satellite Imaging Corporation: Homeland Security, http://www.satimagingcorp.com/svc/homeland_security.html and <http://www.satimagingcorp.com/media/images/homeland-security-lg-2.jpg>, 23.2.2008 14
- [668] Scaled Composites: Spaceship One, <http://www.scaled.com/projects/tierone/index.htm>, 15.10.2008 14
- [669] D.J. Schneider, Michigan Technological University, Dep. of Geological Engineering and Sciences: Remote sensing of the global environment – Applications of AVHRR data to global change research, <http://www.geo.mtu.edu/rs/avhrr/>, 23.2.2008 204
- [670] Sciamachy Homepage, <http://www.sciamachy.org/>, 18.3.2008 207
- [671] Space-Based Lidar Wind Working Group Homepage, <http://www.lidar.com/windswg/windswg2.htm>, 23.2.2008 170
- [672] Space.Com: New satellite images give detailed view of NYC, Pentagon Disasters, http://www.space.com/news/ikonos_wtc_010912.html, 23.2.2008 191
- [673] Space.com, B. Berger: NASA's terra satellite moved to avoid chinese ASAT debris, 6.7.2007, http://www.space.com/news/070706_sn_china_terra.html, 21.2.2008 36
- [674] Space.com: Avalanche photographed on Mars, <http://www.space.com/scienceastronomy/080303-mars-avalanche.html>, 18.3.2008 181
- [675] Space Review, Taylor Dinerman: NPOESS, another example of technological overreach?, 28.11.2005, <http://www.thespacereview.com/article/505/1>, 23.2.2008 154
- [676] SPOT IMAGE Homepage, <http://www.spot.com/>, 6.2.2008 12, 119, 200
- [677] SPOT IMAGE: Defense, Intelligence, Security, <http://www.spot.com/web/SICORP/431-sicorp-defense-intelligence-security.php>, 23.2.2008 192
- [678] SPOT IMAGE: Hazard management and mitigation, <http://www.spot.com/web/SICORP/440-sicorp-hazard-management-and-mitigation.php>, 23.2.2008 192
- [679] SPOT IMAGE: Gallery – Canberra, http://www.spot.com/automne_modules_files/sicorp_gal/edited/r69_spot5_2_5_cn_camberra_1280.jpg, 23.2.2008 109
- [680] SPOT IMAGE: Gallery – Mont Velier, http://www.spot.com/automne_modules_files/sicorp_gal/edited/r129_3d_valier_1280.jpg, 23.2.2008 121
- [681] SPOT Image: Technical information, <http://www.spot.com/web/SICORP/445-sicorp-the-spot-satellites.php>, 11.3.2008 119
- [682] SPOT 5 HRVIR: Vegetation Programme Web Page, <http://www.spot-vegetation.com/>, 23.2.2008 174
- [683] SSC: VIKING - Sweden's first satellite, <http://www.ssc.se/?id=6253>, 2.5.2008 243
- [684] Stern online, Der neue Wettlauf ins All, 14.9.2007, http://www.stern.de/wissenschaft/kosmos/597865.html?nv=ct_mt, 23.2.2008 13
- [685] STSI: James Webb Space Telescope – L2 orbit, <http://www.stsci.edu/jwst/overview/design/orbit.html>, 11.2.2008 68
- [686] SWAMI Homepage, <http://www.ias.sdsmt.edu/rsel/Research/SWAMI/Swami.htm>, 25.2.2008 9
- [687] Technische Fachhochschule Berlin, Labot für gerätetechnik, Optik und Sensorik GOS: CCD http://www.tfh-berlin.de/labore/gos/images/fotos/ccd_pixel_gr.jpg, 11.2.2008 118
- [688] The Baltimore Chronicle, K. Grossmann: U.S. to launch plutonium-powered spaceprobe, 7.5.1997, <http://baltimorechronicle.com/cassini.html>, 23.2.2008 92
- [689] The New York Times, W.J. Broad and D.E. Sanger: Flexing Muscle, China destroys satellite in test, 19.1.2007 <http://www.nytimes.com/2007/01/19/world/asia/19china.html?fta=y>, 10.3.2008 36
- [690] TU Berlin, Hydrogeologie: GRASS modules, <http://www-pool.math.tu-berlin.de/~soeren/grass/modules/GRASS-NASA-WMS-Modul-Final.png>, 23.2.2008 128

- [691] UCAR: MOPITT Measurements of Pollution in the Troposphere, <http://web.eos.ucar.edu/mopitt/>, 23.2.2008 218
- [692] UCS: UCS Satellite Data Base, http://www.ucsusa.org/global_security/space_weapons/satellite_database.html, 23.2.2008 13, 14, 45, 49, 193, 198, 210, 211, 212
- [693] UCS: Debris in Brief: Debris from Space Weapons, http://www.ucsusa.org/global_security/space_weapons/debris-in-brief.html, 23.2.2008 36
- [694] United Nations Environment Program DEWA/GRID-Europe: Glacier change and related hazards in Switzerland, http://www.grid.unep.ch/activities/global_change/switzerland.php, 23.2.2008 180
- [695] Universität Bern: NOAA AVHRR Realtime Products, <http://saturn.unibe.ch/rsbern/noaa/dw/realtime/>, 23.2.2008 204
- [696] Universität Bremen, Institut für Umweltphysik: SCIAMACHY Homepage, <http://www.iup.physik.uni-bremen.de/sciamachy/index.html>, 23.2.2008 208
- [697] Universität Hamburg, Institut für Meereskunde: Definition of the TerraSAR-L Cartwheel Constellation, http://www.ifm.uni-hamburg.de/~wwrs/project_estec2.htm, 23.2.2008 158
- [698] Universität Jena, Institut für Geographie: TerraSAR-L – Demonstration of L-Band capabilities using JERS SAR Data, <http://www.terrasar.uni-jena.de/index.html>, 23.2.2008 210
- [699] Universität Karlsruhe, Bernhard Mühr: Satellitenbilder der Woche, <http://imkhp2.physik.uni-karlsruhe.de/~muehr/Sat/satsp178.htm>, 4.2.2008 17
- [700] University of Arizona, <http://www.geo.arizona.edu/Antevs/nats104/00lect28ozonspol.gif> 7
- [701] University of Arizona: Mars Odyssey Mission THEMIS, <http://themis.asu.edu/>, 25.2.2008 139
- [702] University of Lund, Lund Space Weather Center, Homepage <http://www.lund.irf.se/>, 23.2.2008 90
- [703] University of Stuttgart, Institute of Space Systems: Flying Laptop – Satellite Design, <http://www.kleinsatelliten.de/flp/index.en.php> 135
- [704] US Congress: Surface Remote Sensing/4, HRMSI, <http://www.ciesin.org/docs/005-356/005-3564.html>, 1.3.2008 200
- [705] USGS: Advanced Very High Resolution Radiometer, <http://edc.usgs.gov/guides/avhrr.html>, 23.2.2008 129, 204
- [706] USGS: Declassified Satellite Imagery - 1 (1996), <http://edc.usgs.gov/guides/displ.html>, 23.2.2008 93
- [707] USGS: Integrated Vegetation Mapping Viewer, <http://ivm.cr.usgs.gov/viewer/viewer.htm>, 23.2.2008 176
- [708] USGS: LandSat Data Continuity Mission (LDCM) Homepage, <http://ldcm.usgs.gov/LDCMHome.php>, 23.2.2008 95, 122, 198
- [709] USGS: LandSat Data Continuity Mission (LDCM), Science Team Meeting Jan 8, 2008, <http://ldcm.usgs.gov/january2008MeetingAgenda.php>, 23.2.2008 95, 122, 198
- [710] USGS, EROS: Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), <http://edc.usgs.gov/products/satellite/avhrr.html>, 23.2.2008 129, 204
- [711] USGS, EROS: Declassified Satellite Imagery - 1, <http://edc.usgs.gov/products/satellite/declass1.html>, 23.2.2008 93
- [712] USGS, EROS: Multispectral Scanner MSS, <http://edc.usgs.gov/products/satellite/mss.html>, 23.2.2008 122
- [713] USGS, EROS: Thematic Mapper (TM), <http://edc.usgs.gov/products/satellite/tm.html>, 23.2.2008 122
- [714] USGS, EROS: LandSat Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), <http://edc.usgs.gov/products/satellite/landsat7.html>, 23.2.2008 122, 128, 199
- [715] USGS Yellowstone Volcano Observatory: Recent ups and downs of the Yellowstone Caldera, <http://volcanoes.usgs.gov/yvo/2007/upsanddowns.html>, 19.3.2008 189, 211

- [716] Virgin Galactic, Home, <http://www.virgingalactic.com/>, 15.3.2008 14
- [717] Washington Post, V. Loeb: Hobbyist track down spies in sky, 20.2.1999, <http://www.fas.org/irp/news/1999/02/1431-022099-idx.htm>, 10.3.2008 48, 111
- [718] Wikipedia: Big Bird (KH-9), <http://en.wikipedia.org/wiki/KH-9>, 21.2.2008 44, 93
- [719] Wikipedia: Caldera (Krater), [http://de.wikipedia.org/wiki/Caldera_\(Krater\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Caldera_(Krater)), 19.3.2008; englischsprachige Version zeigt andere Beispiele und Links unter <http://en.wikipedia.org/wiki/Caldera>, 19.3.2008 189
- [720] Wikipedia: Chang'e, http://de.wikipedia.org/wiki/Chang'e_1, 23.2.2008 13
- [721] Wikipedia: Chang'e, http://en.wikipedia.org/wiki/Chang%27e_1, 23.2.2008 13
- [722] Wikipedia: Corona http://en.wikipedia.org/wiki/Corona_%28satellite%29, 23.2.2008 12, 93
- [723] Wikipedia: Disaster Monitoring Constellation, http://en.wikipedia.org/wiki/Disaster_Monitoring_Constellation, 18.2.2008 20, 192
- [724] Wikipedia: Echo Ballon Satellite, http://en.wikipedia.org/wiki/Echo_satellite, 21.2.2008 35
- [725] Wikipedia: EnviSat, <http://de.wikipedia.org/wiki/Envisat>, 6.2.2008 12
- [726] Wikipedia: Erdbeobachtungssatelliten, http://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Erdbeobachtungssatelliten 198
- [727] Wikipedia: Fernerkundung, <http://de.wikipedia.org/wiki/Fernerkundung>, 5.2.2008 6
- [728] Wikipedia: Global Positioning System, http://en.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System, 8.2.2008 52, 211
- [729] Wikipedia: Internationale Raumstation ISS, http://de.wikipedia.org/wiki/Internationale_Raumstation, 23.2.2008 13
- [730] Wikipedi: International Space Station, http://en.wikipedia.org/wiki/International_Space_Station, 23.2.2008 13
- [731] Wikipedia: Kepler, http://de.wikipedia.org/wiki/Johannes_Kepler, 10.3.2008 22
- [732] Wikipwdia: Krakatoa, <http://en.wikipedia.org/wiki/Krakatoa>, 19.3.2008, auch <http://de.wikipedia.org/wiki/Krakatau> 189
- [733] Wikipedia: Laser Doppler Anemometrie, <http://de.wikipedia.org/wiki/Laser-Doppler-Anemometrie>, 18.3.2008 170
- [734] Wikipedia: George R. Lawrence, http://en.wikipedia.org/wiki/George_R._Lawrence, 6.2.2008 10
- [735] Wikipedia: Military-industrial complex, http://en.wikipedia.org/wiki/Military-industrial_complex, 20.2.2008 13
- [736] Wikipedia: MIR (Russian Space Station), <http://en.wikipedia.org/wiki/Mir>, 23.2.2008 12, 40
- [737] Wikipedia: Molniya, http://en.wikipedia.org/wiki/Molniya_orbit, 23.2.2008 50
- [738] Wikipedia: Normalized Difference Vegetation Index, http://en.wikipedia.org/wiki/Normalized_Difference_Vegetation_Index, 23.2.2008 174
- [739] Wikipedia: Mid Air Retrieval, http://en.wikipedia.org/wiki/Mid-air_retrieval, 6.2.2008 113, 278
- [740] Wikipedia: MKF 6, http://de.wikipedia.org/wiki/MKF_6, 10.3.2008
- [741] Wikipedia: NavStar, http://de.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System, 23.2.2008 211
- [742] Wikipedia: Photo manipulation, http://en.wikipedia.org/wiki/Photo_manipulation, 21.3.2008 327
- [743] Wikipedia: Remote Sensing, http://en.wikipedia.org/wiki/Remote_sensing, 5.2.2008 5
- [744] Wikipedia: San Francisco 1906, http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b3/San_Francisco_in_ruin_edit2.jpg, 5.2.2008 10
- [745] Wikipedia: Shoemaker-Levy 9, http://en.wikipedia.org/wiki/Comet-Shoemaker-Levy_9#Impacts, 7.2.2008 35
- [746] Wikipedia: Solar Sail, http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_sail, 23.2.2008 67

- [747] Wikipedia: Skylab, <http://en.wikipedia.org/wiki/Skylab>, 23.2.2008 12
- [748] Wikipedia: SpaceLab, <http://de.wikipedia.org/wiki/Spacelab>, 23.2.2008 97
- [749] Wikipedia: Sputnik, http://en.wikipedia.org/wiki/Sputnik_program, 6.2.2008 11
- [750] Wikipedia: Sputnik, <http://de.wikipedia.org/wiki/Sputnik>, 6.2.2008 11
- [751] Wikipedia: Spionagesatelliten, http://en.wikipedia.org/wiki/Spy_satellite, 6.2.2008 12
- [752] Wikipedia: Spy Satellite KH-11, <http://en.wikipedia.org/wiki/KH-11>, 8.2.2008 44, 53, 93
- [753] Wikipedia: Spy Satellite KH-12, <http://en.wikipedia.org/wiki/KH-12>, 8.2.2008 44, 53, 93
- [754] Wikipedia: Spy Satellite KH-13, <http://en.wikipedia.org/wiki/KH-13>, 21.2.2008 44, 93
- [755] Wikipedia: Swing By, <http://de.wikipedia.org/wiki/Swing-by> 74
- [756] Wikipedia: Swing By (Gravity Assist), http://en.wikipedia.org/wiki/Gravity_assist, 7.2.2008 35, 74
- [757] Wikipedia: TerraSAR, <http://de.wikipedia.org/wiki/TerraSAR>, 19.2.2008 210
- [758] Wikipedia: U2, http://en.wikipedia.org/wiki/Lockheed_U-2, 6.2.2008 11, 93
- [759] Wikipedia: Weltraumschrott, http://en.wikipedia.org/wiki/Space_debris, 23.2.2008 36
- [760] Wikipedia: Wettlauf ins All, http://de.wikipedia.org/wiki/Wettlauf_ins_All, 20.2.2008 13
- [761] Wikipedia: Wettlauf ins All (Space Race), http://en.wikipedia.org/wiki/Space_Race, 20.2.2008 13
- [762] Wikipedia: Widerstandsbeiwert, <http://de.wikipedia.org/wiki/Str%C3%B6mungswiderstandskoeffizient>, 7.2.2008 38
- [763] X-Prize Foundation, <http://www.xprize.org/>, 15.3.2008 14
- [764] X-Prize Foundation: Ansari X-Prize, <http://www.xprize.org/x-prizes/ansari-x-prize>, 15.3.2008 14
- [765] X-Prize Foundation: Google Lunar X-Prize, <http://www.googlelunaxprize.org/>, 15.3.2008 14
- [766] Zarya – Soviet, russian and international spaceflight: The MIR orbital complex, <http://www.zarya.info/Diaries/StationsMir/Mir.php>, 23.2.2008 12, 40
- [767] Zeit online 5/2008, B. Schwentker: Spion im Sturzflug, <http://images.zeit.de/text/online/2008/05/us-satellit-absturz>, 15.2.2008 8, 13, 36
- [768] <http://www.heavens-above.com/issheight.asp> 39, 86

Index

- Ähnlichkeitsdecodierung, 316
- Äquivokation, 310
- Übergangsellipse, 64
- Übergangswahrscheinlichkeit, 291
- Übertragung
 - passiv, 280, 281
- Übertragungsfehler, 309
- Übertragungsfunktion, 334
- Übertragungskanal, 281, 309
 - binärsymmetrischer, 315
 - Entropiefluss, 310
 - Entropifluss, 310
 - gestört, 309
- Übertragungskapazität, 311
- Übertragungsproblem
 - semantisch, 282
- Übertragungsrage, 321

- LandSat 7, 209

- A-Train, 144, 217, 220
- AATSR, 144, 207
- Abbildungsmaßstab, 97
- Ablenkwinkel, 76
- Abplattung, 41
- Absorption, 132
- Absorptionskoeffizient, 85
- Absorptionsvermögen
 - spektrales, 132
- Abtasttheorem, 294, 295
- ACE, 52, 68
- ACRIM, 226, 228
- ADEOS, 153
- Advanced Along Track Scanning Radiometer, 207
- Advanced Microwave Scanning Radiometer, 169
- Advanced Microwave Sounding Unit, 170
- Advanced SAR, 206
- Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection, 169
- Advanced Very High Resolution Radiometer, 12, 44, 129, 202, 204

- Advanced Vidicon Camera System, 204
- Aerosol, 160
- AIRS, 164, 169, 219, 221
- Aktivierungsenergie, 136
- Albedo, 223, 230, 258
- Aliasing, 295, 296
- ALOS, 5
- ALT, 170
- Altimeter, 149, 150, 170
- AMAS, 161
- AMSR, 144, 169
- AMSR-E, 219
- AMSU, 144, 170, 203
- AMSU-A, 205, 219
- Anfangsgeschwindigkeit
 - elliptisch, 28
 - hyperbolisch, 28
 - parabolisch, 28
- Anomalie
 - wahre, 29
- Antenne
 - entdrallt, 322
- Antennengewinn, 322, 323
- Anti-Satelliten-Waffe, 36
- Anti-Satellitenwaffe, 8, 52
- Antikoinzidenz, 236, 246
- Aphel, 28, 64
- Apogäum, 28, 30, 39, 43
- Apollo, 97, 278
- Apozentrum, 28, 30
- Apsidendrehung, 42, 43
- Apsidenlinie, 28, 29, 31, 33
- Aqua, 21, 45, 53, 144, 164, 169, 170, 216–220
- ARGOS, 11
- ARJ, 307
- ASAR, 206
- ASCAT, 205
- ASCII-Code, 301
- ASTER, 5, 169, 179, 218
- astronomical unit, 257
- ATLID, 170
- Atmosphäre, 83, 241

- Gezeiten, 36
- Stockwerkstruktur, 83
- Atmospheric Infrared Sounder, 169
- Atmospheric Lidar, 170
- ATS-3, 14
- AU, 257
- Aufklärungssatellit, 44
- Auflösung
 - photometrisch, 122
- Auflösungsvermögen, 92, 96, 125
 - Boden, 44
 - Boden-, 92, 125
 - Film, 108
 - Kamera-Film, 105
 - Mikrowellen, 142
 - Objektiv, 105, 106
 - photographische Emulsion, 105, 107
 - räumliche, 115
 - räumliches, 16, 105
 - IR, 137
 - MSS, 123
 - SAR, 157
 - TM, 124
 - radiometrisch, 113, 115, 116, 125
 - radiometrisches, 92, 105, 111
 - IR, 137
 - Spektral, 125
 - spektrales, 105, 110
 - TM, 124
 - thermales, 105
 - thermisches, 92, 111
 - Verschlechterung, 112
 - Winkel, 106
 - zeitliches, 92, 105
- Aura, 144, 146, 220
- AVCS, 204
- average bond energy, 263
- AVHRR, 5, 12, 44, 129, 137, 174–176, 186, 202, 204, 205, 346
- Azur, 55
- Bahn
 - äquatorial, 31, 32, 42
 - geostationär, 32, 89
 - polar, 31, 32, 42
 - pseudo-geostationär, 49
 - sonnensynchron, 45
 - sonnensynchron, 31, 32, 42, 43, 47
 - stark exzentrisch, 32
- Bahndrehung, 42
- Bahnebene
 - Drehung, 42
 - Gleichung, 26
- Bahnellipse
 - Drehung, 43
- Bahngleichung, 27, 28
- Bahnparameter, 27, 28, 31, 33
- Bahnschrumpfung, 39
- Bahnstörungen, 33
- Bandbreite, 311
- Barnsley Farn, 352
- Bastille Day event, 261, 264, 265
- Bethe–Bloch, 232
- Bethe–Bloch equation, 263, 264, 268
- Bethe–Bloch-Formel, 76, 233
- BigBird, 44
- Bildelement, 106
- Bilderzeugung
 - fraktale, 351
- Bildkomprimierung
 - FELICS, 348
 - fraktale, 351
 - GIF, 348
 - JPEG, 348
 - PNG, 348
- Bildpunkt, 308
- Bildverschiebung, 112
- Binärzeichen, 284, 301
- binary digit, 284
- Binet’sche Gleichung, 29, 30, 64, 76, 78
- Bit, 284, 301
- bit, 284, 301
- Bitenergie, 312
- Bitrate, 312, 321
- Bitzeit, 312
- Blendenöffnung, 106
- Blickfeld, 97
- Blickwinkel, 97
- Blockcode, 290, 301, 313, 315
- Blockcodierung
 - Matrixform, 320
- Bodenauflösung, 12
 - SAR, 157
- Bodenauflösungsvermögen, 16, 44, 92, 97, 105, 106
 - IR, 137
 - MSS, 123
 - TM, 124
- Bodenfeuchte, 146
- Bodennutzung, 347
- Bodenschätze, 7
- Bodenspur, 45, 46
- Bolometer, 225
- Bouger–Lambert–Beer’sches Gesetz, 85
- Bragg peak, 264, 269
- Bragg-Peak, 233
- Bremsstrahlung, 234, 266, 270
- bremsstrahlung, 265, 268
- Brennschluss, 57

- Butterworth-Filter, 334
 BUV, 161, 164
 CaII-Linie, 229
 calculated ion-pair production rate, 264
 Caldera, 189
 CALIOP, 221
 CALIPSO, 220, 221
 Carthweel, 158
 CartoSat, 5
 Cartwheel, 55, 114, 158, 200, 204, 210
 Cassini, 92
 Cassini-Huygens, 260
 CAWSES, 222, 261, 262, 276
 CBers, 5
 CCD, 94, 101, 117–119
 CELIAS, 243
 Cerenkov-Detektor, 235
 Cerenkov-Effekt, 234
 Cerenkov-Zähler, 236
 CERES, 161, 218, 220
 CGRO, 53
 Challenging Minisatellite Payload, 208
 CHAMP, 88, 198, 208
 Chang'e 1, 13
 Charged Coupled Device, 117
 climate change, 95, 201
 CloudSat, 21, 45, 220, 221
 Cluster, 347
 Cluster-II, 52
 CME, 89
 CMIS, 154
 Coastal Zone Color Scanner, 20, 169, 186
 Codierbaum, 303
 Codierung
 Fano, 305
 Huffman, 304
 ideale, 304
 redundanzfreie, 304
 Shannon, 304
 Coloumbia, 80
 Compton Gamma Ray Observatory CGRO,
 53
 Compton scattering, 268
 Coriolis, 154
 Corioliskraft, 69
 CORONA, 93
 Corona, 12
 Coronal Mass Ejection, 89
 cosmogenic nuclides, 262
 CPR, 221
 Crutzen, 262
 CZCS, 20, 169, 186, 187
 Dämpfung
 Atmosphäre, 324
 Daten
 operationale, 277
 Datenübertragung
 progressive, 351
 Raster, 351
 dBm, 323
 Decodierbarkeit, 303, 316
 Defense Meteorological Satellite Program, 154
 Dehnung, 337
 besondere, 338
 Histogramm angeglichen, 338
 lineare, 338
 Deklassifizierung, 93, 108
 DGPS, 52, 212
 Diamant, 118, 209
 Dichte
 Hochatmosphäre, 37
 differentielles GPS, 212
 Digramm-Struktur, 293
 Digramm-Wahrscheinlichkeit, 291
 Disaster Management, 10
 Disaster Monitoring Constellation, 20, 192
 Discoverer 14, 93
 Distanzverfahren, 344
 diurnal bulge, 37
 DMC, 20, 192
 DMSP, 13, 94, 154
 Doppelsternsystem, 72
 Dopplerverschiebung, 149, 155
 Downlink, 91
 Drachen, 8, 10
 Drehimpulssatz, 76
 Drehung der Bahnebene, 42
 Drehung der Bahnellipse, 43
 Drei-Achsen-Stabilisierung, 54, 55
 Dreikörperproblem, 68, 69
 eingeschränktes, 69
 Dunstfilter, 112
 Dunstkorrektur, 112, 334, 336
 Dunststreuung, 85, 98, 102, 124, 129, 334, 335
 Earth Observing System, 21, 168, 216
 Earth Observing System, 212
 Earth Radiation Budget Experiment, 204
 Earth Radiation Budget Satellite, 224
 Earth Resource Satellite, 148
 Earth Resources Technology Satellite, 103, 199
 Earth System Science Pathfinder, 221
 Earth Terrain Camera, 97, 108, 195
 Echo-Ballon-Satellit, 35, 281
 edge enhancement, 341
 Effektivitätsproblem, 282
 Effektivtemperatur, 133, 182, 223, 258, 259
 Erde, 223

- Effizienz, 303
 El Niño, 184, 185
 electron trajectory, 268
 Elementarzeichenbedarf, 302
 Ellipse, 28, 31
 Ellipsenbahn
 Gesamtenergie, 29
 EMBERSat, 20
 EmberSat, 135
 Emission, 160
 Emissionsvermögen
 mittleres, 133
 spektrales, 132
 Empfänger-Entropie, 310
 Energiegleichung, 29
 Energieintegral, 26
 Energiekonstante, 26, 28, 29
 Energieverlust, 232, 236, 237
 Energieverlustkurve, 233
 energy loss distribution, 265, 266
 Enhanced Thematic Mapper, 128
 Enhanced Thematic Mapper Plus, 199
 Enhanced Thematic Mapper+, 122
 Entropie, 287
 Übertragungskanal, 310
 Empfänger, 310
 Sender, 310
 Entweichgeschwindigkeit, 62
 Environmental Satellite, 205
 Environmental Science and Services Administration, 204
 EnviSat, 12, 21, 38, 53, 90, 91, 144, 149, 161, 163, 169, 198, 205
 EOS, 21, 212, 216, 217
 EOS-A, 216
 EOS-B, 216, 219
 EPHIN, 239
 Epoche, 31
 ERB, 228
 ERBE, 204
 ERBS, 224, 228
 Erde, 258
 Abplattung, 35, 41, 42
 Erdkundungssatellit, 44
 Erdfernerkundung, 7
 Ergiebigkeit, 132
 ergodisch, 293, 294
 ERS-1, 148–150, 157
 erste kosmische Geschwindigkeit, 24
 ERTS-1, 103, 199
 ESMR, 144
 ESSA, 94, 204
 ESSA 3, 204
 ESSP, 221
 ETM, 128, 199
 ETM+, 122, 128, 199, 200, 209
 Exosphäre, 84
 Explorer, 13
 Explorer 1, 90
 Explorer 6, 93, 113, 114
 Explorer 7, 42
 Exzentrizität, 27, 28, 31, 42, 47

 Fackeln, 229
 Falschfarbenaufnahme, 18
 Falschfarbenbild, 95, 96, 102
 Beispiel, 101
 Farbzuordnung, 101
 Vegetation, 101
 Falschfarbenfilm, 335
 Fano-Codierung, 305
 FAPAR, 174
 Farbe des Meeres, 186, 187
 Farbfilm, 95, 99, 102
 Farbmischprojektor, 95, 96
 Fax, 307
 FCKW, 83
 Fehlererkennung, 312, 313, 315, 320
 Fehlerkorrektur, 313, 315
 FELICS, 348
 Fernerkundung, 6
 field reversal, 262
 Film
 charakteristische Kurve, 107, 108
 Kontrast, 108
 Korngröße, 108
 räuml. Auflösung, 108
 Rückführung, 278
 Filmrückführung, 112, 113
 Flächensatz, 23, 24, 26, 27
 Flare, 36, 252
 Flat Plate Radiometer, 204
 Flourchlorkohlenwasserstoffe, 83
 Fluchtgeschwindigkeit, 30, 65
 Flughöhe, 31, 37, 96
 Fluxgate-Magnetometer, 244
 Flying Laptop, 135
 FormoSat, 5
 Forschungssatellit, 44, 52
 FPR, 204, 222
 fraktale Bilderzeugung, 351
 Fundamentalsatz
 Kanalcodierung, 311
 Quellencodierung, 306

 galactic cosmic rays, 267
 Galileo, 63, 77, 212
 Gamma Ray Observatory GRO, 53
 Gasglocke, 37

- Gauß-Filter, 333, 334
 Gauß-Verteilung, 333
 Gauß-Wichtung, 343
 GEANT 4, 267
 Geländeklassifikation, 347
 Gemini, 95
 Gemini XI, 6
 Generator-Matrix, 317, 319
 Genesis, 12, 277, 278
 GeoEye, 5, 198, 200
 Geoid, 35, 48, 149, 150
 Geokorona, 84
 geomagnetic field, 262, 270
 GEOS-3, 149
 Geoscience Laser Ranging System, 170
 geostationärer Satellit, 48
 Geostationary Earth Radiation Budget, 201
 GERB, 201
 Gesamtenergie
 Ellipsenbahn, 29
 Gesamtstrahlungsstrom, 133
 Geschwindigkeitsgewinn, 62
 Geschwindigkeitszuwachs, 58
 Gezeiten
 Atmosphäre, 36
 giant planets, 258
 GIF, 348
 Giotto, 121
 Glättung, 333, 343
 Gauß, 333
 linear, 333
 Glättungsfilter, 333
 GLAS, 151
 Gleichgewicht
 lokales thermodynamisches, 132
 Gleichstromanteil, 349
 global change, 5, 8, 20, 21, 82, 88, 94, 192,
 198, 200, 204, 205, 222, 224
 Global Ozone Monitoring by Occultation of
 Stars, 207
 Global Positioning System, 51, 211
 GLONASS, 212
 GLRS, 149, 170
 GOES, 8, 201
 Golfstrom, 141, 142
 GOME, 7, 207
 GOME 2, 205
 GOMOS, 207
 Google Earth, 5, 12, 15, 200
 GPS, 51–53, 199, 211
 differentielles, 52
 GPS-Satelliten, 51
 Graphics Interchange Format, 348
 GRAS, 205
 Gravitationsgesetz, 23
 Gravitationsumlenkung, 74
 gravity assisted navigation, 74
 greenhouse gas, 275
 Grenzfrequenz, 334
 GRO, 53
 Großkreis, 28
 Ground Penetrating Microwave Instrument,
 149
 GRS, 248

 hadronic interaction, 266
 Halbachse, 28, 31
 Halbleiterdetektor, 234
 Halo-Orbit, 68
 Hamming-Distanz, 314, 315
 Hamming-Schranke, 316
 HAMMONIA, 276
 HAO-Koronograph, 249
 Hasselblad, 6, 11, 95
 HCMM, 137, 138, 169
 Heat Capacity Mapping Mission, 137
 Helios, 235
 Helios 1, 55
 Helios-Teilchenteleskop, 235
 Helium, 259
 Heterosphäre, 85
 High Resolution Multispectral Imager, 200
 High Resolution Visible, 120
 High-Resolution Imaging Spectrometer, 110,
 168, 169
 Hill's Zero-Velocity Curves, 70
 HIRDLS, 220
 HIRIS, 110, 168, 169
 HIRS, 203, 205
 HO_x, 262, 270, 272
 Hochatmosphäre, 36, 37, 40
 Dichte, 37
 Dichteveriation, 37
 Reibung, 35, 37
 Temperaturmessung, 37
 Hochpass, 334
 Hohmann-Übergänge, 65
 Hohmann-Bahn, 56, 63, 66
 Hohmann-Ellipse, 64, 65
 Homosphäre, 85
 HRIS, 169
 HRMSI, 200
 HRV, 16, 120, 121, 135
 HRVIR, 174
 HSB, 219
 HST, 52, 53
 Hubble Space Telescope, 52
 Hubble Space Telescope HST, 53
 Huffman, 308

- Huffman-Code, 306
 Huffman-Codierung, 304, 348, 349
 HXIS, 247
 HXRBS, 246
 Hydrobot, 259
 Hydrometeor, 165
 Hyperbel, 28
 Hyperzeichen, 283, 296

 IASI, 205
 ICESat, 151
 IFOV, 106
 Ignorosphäre, 84
 IIR, 221
 Ikonos, 5, 6, 12, 45, 109, 116, 121, 157, 198, 200, 210
 IMP, 52
 Impedanzsonde, 243
 Imperial Valley, 346, 347
 Improved TIROS Operational System, 204
 Information, 280–284
 Definition, 282
 Informationsaufnahme
 Mensch, 296
 Informationsfluss, 310
 Informationsgehalt, 284, 285, 301
 mittlerer, 287
 Informationskanal, 283
 Informationsquelle, 283
 Informationsverdichtung, 298
 Infrarot, 102
 Infrarotfarbfilm, 100, 102
 Schichtstruktur, 100
 spektrale Empfindlichkeit, 102
 Infrarotfilm, 99
 Infrarotscanner, 137
 Inklination, 19, 31, 42–44, 47, 50, 123
 Instantaneous Field of View, 106
 Intelsat V, 325
 interaction cross section, 265
 Interferenz, 155
 Interkosmos, 94
 Intermediate and Thermal Infrared Radiometer, 169
 International Space Station, 86
 Interplanetary Monitoring Platform, 52
 ion–pair production, 263, 264, 268
 ion–pair production rate, 263
 Ionisation, 232
 ionization, 261, 263, 266
 Ionosphäre, 84, 85, 242
 Irrelevanz, 310
 ISEE, 256
 ISEE-1,2, 52
 ISEE-3, 52, 68

 ISS, 39, 53, 79, 80, 86, 89, 112
 ITIR, 169
 ITOS, 204

 Jacobi-Konstante, 70, 72, 73
 Joint Photographic Experts Group, 348
 JPEG, 348–350
 Jupiter, 258, 259

 Kamera
 mehrlinsige, 95
 Kanalcodierung, 280, 281, 301, 308, 313
 Fundamentalsatz, 311
 Kanalkapazität, 310, 311
 maximale, 310
 Kantenanreicherung, 341–343
 gerichtete, 341
 ungerichtete, 342
 Kavoshgar, 13
 Kegelschnitt, 28
 Kehrbesen, 96, 114, 118, 119, 128
 Kehrbesentechnik, 119
 Kepler'sche Gesetze, 23
 Kernel, 329, 330
 Kantenanreicherung, 342
 Kernwechselwirkung, 234
 KET, 240
 KeyHole, 12, 93
 KH, 12, 93
 KH-11, 44, 53
 KH-12, 44, 53
 KH-13, 45
 Kirchoff–Planck'sches Gesetz, 132
 Klassifikation
 automatische, 344
 multitemporal, 345
 unitemporal, 345
 Klassifikationsdiagramm, 348
 Knotenlinie, 31
 Kohlendioxid, 259
 Koinzidenzbedingung, 236
 Kommunikation, 280–282
 passiv, 36
 Kommunikationsproblem
 Effektivitätsproblem, 282
 semantisch, 282
 technisch, 282
 Kommunikationssatellit, 44, 48, 281
 Kommunikationssystem, 281
 Kommunikationswirkungsgrad, 312
 Kontrast, 96, 108
 Kontrastanreicherung, 111, 337–341
 Koronograph, 249
 Korrekturfähigkeit, 314, 316
 maximale, 316

- Kosinustransformation, 349
 kosmische Geschwindigkeit
 erste, 24, 28, 29, 60, 78
 zweite, 29, 78
 Kosmos 1042, 92
 Kosmos 1097, 39
 Kosmos 1402, 148
 Kosmos 1500, 148, 155
 Kosmos 243, 144
 Kosmos 954, 92, 148
 Kourou, 31
 Kreisbahngeschwindigkeit, 24, 28, 78
 Kriegsdrachen, 9
 Kryobot, 259
 Kugelflächenfunktionen, 35

 LAGEOS, 33, 35, 53, 149, 170, 206
 LAGEOS 1, 35
 Lagrange-Punkt, 35, 68, 69, 71, 73
 Lander, 68, 259
 LandSat, 12, 13, 31, 45, 46, 53, 81, 82, 94,
 105, 109, 111, 116, 121, 122, 135,
 139, 154, 157, 178, 180, 186, 198,
 200, 210, 335, 336, 346, 347
 LandSat 1, 103, 116, 199
 LandSat 2, 116, 199
 LandSat 3, 116, 199
 LandSat 4, 123, 199
 LandSat 5, 95, 122, 123
 LandSat 6, 66, 128, 199
 LandSat 7, 5, 12, 94, 128, 199, 200
 Landsat Data Continuity Mission, 95
 Langmuir Sonde, 243
 Laplace-Integral, 27
 Laplace-Transformation, 341
 Laplace-Vektor, 27
 Laser Atmospheric Wind Sounder, 170
 Laser Retro-Reflector, 206
 Lauflängencodierung, 308, 348
 Laufzeit, 149
 LAWS, 170
 LCDM, 154
 LDCM, 95, 122
 Lebensdauer Photosatellit, 278
 Legendre Polynom, 35
 Leistungsverstärkung, 323
 Lempel–Ziv-Algorithmus, 306, 307, 348, 364
 Levy-Shoemaker 9, 35
 Librationspunkt, 68
 Limb Sounding, 85
 Limb-Sounding, 207
 Limb-Viewing, 160
 linear energy transfer, 267
 logarithmus dualis, 285
 Lokalzeit, 241

 LRR, 149, 206
 Luftschauber, 86
 Luftwiderstand, 39

 Magellan, 67, 148, 158
 magnetic field reversal, 275
 Magnetopause, 89
 Magnetosphäre, 36, 87, 89, 241
 Manlifter, 9
 MAPS, 163
 Mariner, 74, 117
 Mariner 10, 76, 117
 Mariner 2, 260
 Mariner 4, 260
 Markoff-Prozess, 293
 Mars, 257, 258
 Mars 1, 260
 Massenverhältnis
 totales, 62
 Maximum Likelihood Method, 345
 Maximum-Likelihood Decoder, 320
 Medium Resolution Imaging Spectrometer, 169,
 205
 Mehraufwand je Zeichen, 302
 Mehrstufenrakete, 61
 MERIS, 161, 169, 205, 206
 Merkur, 257, 258
 Mesopause, 84
 Mesophyll, 103
 Mesosphäre, 84
 Metalloxid–Silizium-Transistor, 117
 Meteor, 94
 Meteorit, 36
 MeteoSat, 11, 16, 21, 165, 200, 345
 MeteoSat 1, 200
 MeteoSat 8, 200
 MeteoSat Second Generation, 201
 Meteosat Visible and Infrared Radiometer,
 201
 Methan, 259
 Metop, 192, 205
 MFK, 95
 MFK-6, 95, 118
 MHS, 205
 Michelson Interferometer for Passive Atmos-
 pheric Sounding, 206
 Microbolometer, 136
 Microwave Radiometer, 206
 Mikrobolometer, 139
 Mikrowelleninstrumente, 142
 Mikrowellenradiometer, 142, 146
 MIPAS, 161, 206
 MIR, 12, 40, 53
 Mischpixel, 125, 176, 330, 346
 MISR, 16, 111, 218

- Mission to Planet Earth, 21, 163, 168, 172, 198, 212
- Mixed Pixel, 125
- Mixed Pixels, 127, 176, 330, 346
- MKF-6, 93, 94
- MLS, 144, 146, 220
- Moderate-Resolution Imaging Spectrometer, 169
- MODIS, 169, 218, 219
- MODIS-N, 169
- MODIS-T, 169
- Molniya, 30–32, 43, 49, 50, 52, 54, 80
- Molniya 1, 93
- Momentanaufnahme, 45
- Momentintegral, 26, 27
- MOMS, 119
- Monde, 258
- Monitoring, 8
- MOPITT, 163, 218
- MOS, 117
- MSG, 201
- MSR, 201
- MSRS, 209
- MSS, 94, 103, 111, 116, 121–123, 125, 135, 137, 180, 186, 199, 200, 336, 346, 347
- MSU, 161
- Multi-Kanal-Fotografie-6, 93
- Multi-Spectral High Resolution System, 209
- Multi-Spectral-Scanner, 103
- multiple scattering, 265, 268
- Multipolentwicklung, 41
- Multispectral Radiometer, 201
- Multispektralkamera, 95–97, 110
- Multispektralscanner, 96, 122
- Mustererkennung, 297, 300
- MVIR, 201
- MWR, 144, 206
- Nachricht, 282, 284
sichere, 284
- Nachrichtenempfänger, 283
- Nachrichtenquelle, 281, 283
- Nachrichtensenke, 281
- Nachrichtenstrecke, 280
- nachtleuchtende Wolken, 84
- NASA-Hasselblad, 97
- NAvigations System with Time And Ranging, 211
- Navigationssatellit, 44, 51
- NavStar, 51–53, 211
- NDVI, 146, 174–176
- NEMS, 144
- Neptun, 257, 258
- NESDIS, 203
- Netzwerk
magnetisches, 229
- Newton, 23
- Nimbus, 45, 53, 224
- Nimbus 4, 138
- Nimbus 5, 144
- Nimbus 7, 138, 160, 161, 186
- Nimbus-7, 143, 146, 147
- Nimbus 7, 228
- nitrite oxides, 262
- NLC, 84
- NO_x, 262, 264, 265, 270, 272
- NOAA, 11, 12, 16, 17, 129, 198, 203
- NOAA 1, 204
- NOAA 18, 204
- NOAA 2, 204
- NOAA 9, 228
- Noctilucent Cloud, 84
- Noctilucent Clouds, 84
- normalized difference vegetation index, 174
- NPOESS, 13, 154, 204
- NSCAT, 153
- OCO, 161, 163, 220, 221
- Okean, 148
- Okkultation, 160
- Okkultationsinstrument, 163
- OMI, 220
- Operational Vertical Sounder, 12
- optische Tiefe, 165
- Orbiter, 259
- OrbView, 5
- Orthorektifikation, 327
- Ortskurve, 237
- Ozon, 83, 85
- ozone, 261, 262, 264, 265, 272, 275
- Ozonloch, 7
- Ozonschicht, 83
- pair production, 265
- panchromatisch, 97, 99
- Panoramakamera, 95, 96
- Parabel, 28
- PARASOL, 220, 221
- Paritätsbit, 313–315, 320
- particle precipitation, 262
- passive Stabilisierung, 54, 55
- Penetrator, 259
- Perigäum, 28–30, 39
- Perihel, 28, 64
- Perizentrum, 28, 30
- Pflanzengesundheit, 103
- photoionization, 268
- Photozelle, 113
- Pioneer, 74, 76
- Pixel, 106, 308, 328

- Planck'sches Strahlungsgesetz, 132
 Planeten, 257
 erdähnliche, 258
 giant, 258
 innere, 258
 Monde, 257, 258
 Riesen-, 258
 Ringe, 257, 258
 terrestrial, 258
 Plasma, 242
 Pluto, 257–259
 PNG, 348
 POES, 8, 12, 13, 16, 31, 44, 45, 48, 129, 154, 170, 175, 176, 186, 202, 204, 222
 POES 16, 88
 Poisson-Rauschen, 332, 333
 Poisson-Statistik, 332
 polar cap, 262, 270
 Polarisation, 146, 147, 149
 Polarlicht, 84, 89
 Polarlichter, 87
 Polaroval, 87, 89
 Polkappe, 84, 87, 89
 Poseidon-2 Altimeter, 149
 Potentialfunktion, 70
 power law, 267
 Präfix-Code, 303, 304
 Präzession, 42
 Prüfwahl, 313
 Prüfzeichen, 316
 precipitating particles
 energy spectra, 267
 Prewitt-Operatoren, 343
 Produktcode, 320
 progressive Datenübertragung, 351
 progressive transmission, 351
 proton trajectory, 268
 pseudo-geostationär, 49
 Pulsation, 112
 Pulsations-Magnetometer, 244
 Pulshöhenmatrix, 237

 Quader-Verfahren, 345
 Quaderverfahren, 345
 detailliertes, 345
 Quasineutralität, 243
 Quelle
 ergodisch, 294
 statistisch homogen, 294
 Quellencodierung, 280, 281, 301, 302
 Definition, 301
 Fundamentalsatz, 306
 Quellenstatistik, 306
 Quellfunktion, 132
 QuickBird, 5, 12, 111, 157, 198, 200

 QuikSCAT, 153

 RA-2, 149, 206
 Radar, 148, 154
 Radar-Altimeter-2, 206
 RadarSat, 13, 148, 210
 RadarSat-1, 180
 RadarSat-2, 210
 radiometrisches Auflösungsvermögen, 92
 Rakete
 Dreistufenr., 60, 61
 Einstufenr., 60, 61
 Mehrstufenr., 61
 mehrstufige, 60
 Wirkungsgrad, 58
 Zweistufenr., 61
 Raketenformel, 58, 59, 62, 65
 Raketengleichung, 56, 57, 60, 61
 RAR, 155
 raster transmission, 351
 Rasterübertragung, 351
 Raumdämpfung, 322, 323
 Raumsonde, 52
 Rauschen, 311, 332
 Rauschleistungsdichte, 312
 RBV, 115, 116, 121, 123, 199
 Redundanz, 288, 289, 301, 316, 317
 Code, 302
 relative, 289
 Redundanzreduktion, 303
 Regendämpfung, 324
 Reibung, 37, 38
 Hochatmosphäre, 35, 37
 Reibungskraft, 38, 57
 Rektaszension, 31
 relative Redundanz, 289
 remote sensing, 5, 6, 8, 33, 245
 Resonanzsonde, 243
 Restenergie, 236, 237
 Resurs, 95
 retrograd, 42
 Return Beam Vidicon, 115
 RHESSI, 53
 Richtantenne, 321, 322
 Riesenplaneten, 258
 Ringe, 258
 Ringsysteme, 258
 RoSat, 53
 Rover, 259
 run length, 308

 Südatlantische Anomalie, 89, 91
 SAA, 89, 91
 Salton Sea, 346, 347
 SAM, 160, 163–165

- SAR, 149, 154, 156–158
 Cartwheel, 158
 reflektiertes Signal, 156
- Satellit
 Erderkundungss., 44
 Forschungs, 44
 Kommunikations., 44
 Navigations., 44
 Wetters., 44
- Satellitenbahn
 Aufklärungss., 44
 Erderkundungss., 44
 Forschungss., 52
 Kommunikations., 49
 Kommunikations., 48
 Navigations., 51
 Wetters., 48
- Saturn, 258
- Saturn V, 59, 60
- Sauerstoff, 259
- SBUV, 203
- Scanning Multi-Channel Radiometer, 146, 147
- Scanning Multichannel Microwave Radiometer, 143
- Scanning Radiometer, 203, 204
- Scatterometer, 149, 152, 154
 passiv, 154
- Schubkraft, 56, 57
- Schwarz-Weiß-Film, 12
- Schwarz-Weiß-Film, 95, 97
 panchromatisch, 97
- schwarzer Körper, 132
- schwarzer Strahler, 133
- Schwerebeschleunigung, 41
- SCIAMACHY, 161, 163, 207
- Sciamachy, 161
- Sea Floor Mapping, 151, 152
- SeaSat, 45, 53, 148–152, 158, 210, 211
- SeaWinds, 153
- SEC-Vidicon, 115
- secondary electron, 268
- secondary electrons, 264
- Sekundärelektronenvervielfacher, 115
- SEM, 8, 44, 204, 222
- SEM-2, 88, 203, 205, 222
- Sender-Entropie, 310
- Sensorklassen, 92
- SEVIRI, 201
- Shannon Codierung, 304
- Shannon'sches Sampling Theorem, 295
- Shannon-Funktion, 287, 311
- Shannon-Grenze, 312
- Sierpinsky-Dreieck, 351, 352
- Signal, 283, 284
- Signal-Rausch-Verhältnis, 309, 311, 321, 322
- Signalklasse, 283
- Signalverdoppelung, 313
- SIR-A, 148
- SIR-C/X-SAR, 172
- SkyLab, 12, 40, 95, 97, 108, 149, 250
- SLIMCAT/TOMCAT model, 266
- SLRAR, 148
- SMM, 38, 40, 52, 224, 228, 246, 249, 250
- SMMR, 143, 146, 147
- Sobel-Operator, 343
- SOHO, 52, 68, 239, 243, 250, 251
- Sojus, 79
- Solar A, 53
- solar cycle, 273
- solar energetic particle, 261, 275
 energy spectra, 267
- solar energetic particle event
 ozone depletion, 261
- Solar Maximum Mission, 40, 52, 224, 250
- Solar Proton Monitor, 204
- Solarkonstante, 223, 224, 226–229
- SolarMax, 40, 250
- Solarzyklus, 226, 228
- SolWind P78-1, 8
- Solwind P78-1, 52
- Sonnenfleck, 223, 227–229
- Sonnensegel, 67
- sonnensynchrone Bahn, 43, 45, 47
- Sonnenwind, 36, 87, 89, 255
- Sounder, 159
 Limb, 207
 Streuung, 207
- Space Environment Monitor, 8, 44, 88, 204
- space loss, 322
- Space Shuttle, 63, 89, 95, 112, 148, 211
- SpaceLab, 97
- Spacelab, 95
- specific energy loss, 263
- spectral index, 267
- spektrale Empfindlichkeit
 Farbfilm, 102
 Infrarotarbfilm, 102
 MSS, 123
 TM, 123, 124
- Spiegelobjektiv, 97, 107
- Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager, 201
- Spinstabilisierung, 54, 55
- SPM, 204
- SPOT, 12, 13, 16, 31, 45, 53, 81, 109, 111, 116,
 120, 121, 127, 135, 157, 198, 210
- SPOT 4, 119
- SPOT 5, 5, 109, 119, 120, 174

- Spurengas
treibhauswirksam, 224
- Spurengase, 83, 162
treibhauswirksame, 162, 163
- Sputnik 1, 11, 38, 90
- Sputnik 2, 39, 40, 42
- SR, 203, 204
- Störbeschleunigung, 33, 35
- Störungsintensität, 315
- Stabilisierung
Drei-Achsen-S., 54
passive, 54
Spin, 54
Spins., 55
- Standardsignal, 284
- Startfenster, 67, 75
- Startort, 31
- Stefan-Boltzmann Gesetz, 132, 133, 223
- Stefan-Boltzmann-Gesetz, 131
- Stefan-Boltzmann Gesetz, 133
- Stereo, 69, 250, 251
- Stickstoff, 259
- Stoßparameter, 76
- Stockwerkstruktur, 83
- Strömungswiderstandskoeffizient, 38
- Strahlenbelastung, 88, 89
- Strahlungsdruck, 35
- Strahlungsgürtel, 87, 88
- Strahlungsgesetz, 131, 132
- Strahlungstemperatur, 182
- Stratopause, 83
- Stratosphäre, 83
- Stratospheric Aerosol Measurement, 160, 161, 163
- Streifenkamera, 95, 96, 119
- Streuung, 102, 160
Atmosphäre, 334, 335
- SWAMI, 9
- Swath Width, 19, 109, 111
- SWH, 152
- Swing By, 74–76
- Symbolstatistik, 302
- Syncom, 55
- Syndrom Decodierung, 319
- Syndrom-Decodierung, 318
- Synthetic Aperture Radar, 149, 155
- Szintillation, 112
- Szintillationszähler, 234
- Szintillator, 246, 248
- Tauben, 10
- TDRS, 280
- Telekonnexion, 185
- Telemetrie-/Telekommando-Strecke, 280
- Television and Infra-Red Observation Satellite, 11
- Television Infrared Observation Satellite, 202
- Temperatur
Hochatmosphäre, 37
- Temperature Humidity Infrared Radiometer, 138
- Terra, 16, 21, 45, 53, 163, 169, 179, 216–220
- TerraSAR, 45, 91, 206
- TerraSAR-L, 158, 210
- TerraSAR-X, 157, 210
- TerraSat, 148, 280
- TES, 220
- Thematic Mapper, 121–124, 199
- THEMIS, 130
- thermisches Auflösungsvermögen, 92
- Thermosphäre, 84
- THIR, 138
- Tiefpass, 333
- Time-of-Flight, 242
- TIR, 137, 169
- TIROS, 11, 94, 202, 203
- TIROS 1, 203
- TIROS 10, 203
- TIROS 9, 55, 204
- TIROS I, 55, 94
- TIROS M, 204
- TIROS N, 94, 204
- TIROS Operational Satellite, 204
- TIROS Operational Vertical Sounder, 204
- TIROS-N, 129
- TM, 111, 122–124, 127, 128, 137, 138, 157, 180, 199, 200, 335
Einzelbilder, 125
- TOMS, 7, 161, 164
- TOS, 204
- TOS 3, 204
- Total Ozon Mapping Spectrometer, 164
- TOVS, 12
- TRACER, 163
- Tracking and Data Relay System, 280
- Transferbahn, 56, 63
- Transformations-Codierungsverfahren, 349
- Transinformation, 310
- Treibhauseffekt, 135, 224
natürlich, 223
- treibhauswirksame Spurengase, 86
- Trigramm-Häufigkeit, 292
- Trigramm-Häufigkeiten, 292
- Trigramm-Struktur, 293
- Trojaner, 73
- Tropopause, 83, 162
- Troposphäre, 83, 162
- Tropospheric Radiometer for Atmospheric Che-

- mistry and Environmental Research, 163
- Tschernobyl, 139
- TV-NA, 203
- TV-WA, 203
- TVOS, 204
- U2, 11, 12
- Ubar, 171
- Ulysses, 63, 64, 76, 77, 240, 256
- Umlaufzeit, 31
 - siderisch, 257
 - synodisch, 257
 - untere Grenze, 40
- Uplink, 91
- Uranus, 258
- UV-Photographie, 98
- UVSP, 250
- Vanguard 2, 37
- VEEGA, 77
- Vegetation
 - Flaschfarben, 101
- Vegetationsindex, 174, 175
- Venera 1, 260
- Venus, 224, 257–259
- Venus-Earth-Earth gravity assist, 77
- Verbundwahrscheinlichkeit, 291
- Verdrängung, 127
- Verfahren der größten Wahrscheinlichkeit, 345
- Versuchsausgang, 284
- Very High Resolution Radiometer, 204
- VHRR, 204
- Video-Kamera, 94
- Videokamera, 11, 113, 115, 117, 203, 259, 277
 - LandSat, 116
- Vidicon, 115
- Viking, 116
- Visible and Infrared Spin Scan Radiometer, 201
- VISSR, 201
- Vorbeiflieger, 259
- Vorwärtskompensation, 112
- Voyager, 65, 74–76, 117
- Wüstenbildung, 147
- Wahrscheinlichkeit, 284
- Wasserdampf, 83, 259
- Wasserstoff, 259
- Wechselstromanteil, 349
- Weitschweifigkeit, 289
- Wellenhöhe
 - signifikante, 152
- Weltraumschrott, 36
- Weltraumwetter, 8
- Wettersatellit, 44, 48
- Wetterschicht, 83
- WFC, 221
- Widerstandsbeiwert, 38, 57
- Wien'sches Verschiebungsgesetz, 131, 133
- Wien'sches verschiebungsgesetz, 132
- WIND, 52
- WindSat, 154
- Winkelauflösungsvermögen, 106, 107
- Wirkungsgrad, 58, 59
 - äußerer, 58, 59
 - innerer, 58
- WLAN-Ortung, 51
- WorldView, 5
- Yokoh, 53
- Zeichen, 283, 284
- Zeichenhierarchie, 283
- Zeichenkette, 305
- Zeiss-Kamera, 97
- zeitliches Auflösungsvermögen, 92
- Zenit, 93
- Zentrifugalkraft, 69
- ZIP, 307, 348
- ZOO, 307
- Zweikörperproblem
 - eingeschränkt, 24, 25