
Optical Spectroscopy in Natural Sciences: Between Mediation Formats & Open Source Hardware

**Kumulative Dissertation
zur Erlangung des Grades
eines Doktors der Naturwissenschaften**

von

Mattis Leo Volker Osterheider

genehmigt vom Fachbereich Physik der



Osnabrück, im Oktober 2022

Erstgutachter: Prof. Dr. Mirco Imlau
Zweitgutachter: Prof. Dr. Marco Beeken
Tag der Einreichung: 15.11.2022

Посвящается Боге

Contents

1. Introduction	3
2. High-end DIY spectroscopy for teaching natural sciences	8
2.1. A do-it-yourself Czerny–Turner spectrometer: atomic emission, absorption, reflection, and fluorescence spectroscopy in natural sciences	8
2.2. Spectrometer build of LEGO [®] -bricks – innovations for classes in modern chemistry	20
3. High-end DIY spectroscopy for Makers	26
3.1. Maker Movement	27
3.2. 1000 Laser-Hacks for Makers	27
3.3. Volume: Measuring atomic spectra yourself	28
4. High-end DIY spectroscopy at home	33
4.1. Online practical training first round	33
4.1.1. Course of the practical training	33
4.1.2. Used experimental setup	36
4.2. Online practical training second round	37
4.2.1. Course of the practical training	37
4.2.2. Used experimental setup	40
5. High-end DIY spectroscopy at the University	42
5.1. Course of the format Applied Physics / Hands-on Physics	43
5.2. Lecture	45
5.3. Practical raining	46
6. User Studies	48
6.1. Interview Study	48
6.1.1. Evaluation of the practical training and the used Open Hardware based spectrometer	48
6.1.2. Aim of the evaluation & research questions	49
6.1.3. Category system	49
6.1.4. Category based evaluation	59
6.1.5. Discussion and limitations	69
6.2. Questionnaire Study	71
6.2.1. Design of the study	72
6.2.1.1. Sample	72
6.2.1.2. Survey procedure	72
6.2.1.3. Test instruments	72

6.2.2. Results and Discussion	81
6.2.2.1. Hypothesis testing	82
6.2.2.2. Practical training	84
6.2.2.3. Maker measurement system evaluation	85
6.2.2.4. Trust in the measurement system	87
6.2.2.5. Personal experience	88
6.2.2.6. Understanding	91
6.2.2.7. Confidence	92
6.2.2.8. Preference	92
6.2.3. Final discussion of the study	93
7. Conclusion	95
8. Summary	103
Literature	106
A. Publications	112
A.1. Peer-Reviewed Paper	112
A.2. Further Paper	112
A.3. Conference contributions	112
A.4. Books	112
B. Appendix	113
B.1. Case summaries	113
B.2. Interview guideline	117
B.3. Coded text passages	119
B.4. Interview transcripts	136
B.4.1. Interviewtranskript B1	136
B.4.2. Interviewtranskript B2	144
B.4.3. Interviewtranskript B3	151
B.5. Questionnaire: Pretest	160
B.6. Questionnaire: Posttest	166
Acknowledgments	175

1. Introduction

Optical spectroscopy is an indispensable topic in modern natural sciences due to its close relation with its fundamental principles, such as the quantum theoretical principles of light-matter-interaction [1]. In particular, it allows for high-precision characterization of atoms, molecules, and/or solids [2] and shows how energetic states, including the determination of transition probabilities and/or state lifetimes, can be directly accessed. Optical spectroscopy has been decisive for numerous breakthrough technologies and research, such as the invention of the laser and high-resolution laser spectroscopy [3], respectively. Nowadays, spectroscopy is mandatory for inspecting any newly developed material in photonics, such as 2D nanostructures, but it also plays a decisive role in environmental physics and chemistry, e.g., for the qualitative and quantitative determination of hazardous contents in drinking water [4].

An increased interest in mediating and/or communicating the subject of optical spectroscopy not only in the scientific community and in many fields of society connected to natural sciences is, therefore, not surprising. It is very common that the development of mediation formats is based on existing spectrometer hardware, i.e. commercially available spectrometers up to self-build (do-it-yourself, DIY) ones. As a consequence, format development first and foremost do not consider any (possible) changes to the hardware, which limits the creativity of format development. Vice versa, the development of spectrometer hardware aims at particular applications and respective specifications, that may not go along with the requirements of mediation formats. For instance, commercially available spectrometers allow for several, specific applications such as spectroscopy of stellar objects with very high spectral resolution, but their closed optical design prevents from understanding of the overall functionality. It is one of the reasons, that DIY solutions are used more and more, but their field of applications is limited to specific topics and the specifications in spectral resolution and/or signal detection usually are limited. Moreover, problems arise if the hardware is purchased for an already existing format. The change to a different mediation format may be in conflict with the specifications and even deteriorate the systems functionality.

The present thesis takes up this problem and pursues the solution approach of an iterative process in the development of spectroscopy hardware and mediation formats in order to resolve the mutual limitations in design and development, and for all fields of applications and respective target groups. For this purpose, a modular Open Hardware-based spectrometer in Czerny-Turner configuration is used as a starting point, adapted, and optimized for different mediation formats. At the same time, the modularity of the hardware is utilized to enable the most versatile range of applications within the formats.

The following paragraphs summarizes the state-of-the-art knowledge in existing hardware for mediation purposes as well as the common mediation formats along different target groups:

State-of-the-art hardware: One field deserving special attention is teaching natural sciences in school. Due to the variety of applications for UV-VIS spectroscopy, such as transmission,

fluorescence, and reflection spectroscopy, it can be used in different disciplines of sciences (especially physics, chemistry, and biology), but also can be applied across different grades and school types with high flexibility. For this purpose, the availability of educational hardware for training spectroscopy with specific requirements is essential. The hardware needs to consider different educational contexts such as high-precision measurements of atomic lines or the determination of small quantities of hazardous contents in drinking water, while achieving a high cost-benefit factor. In addition, it should allow for the most versatile teaching possible, e.g., teaching its theoretical or practical operation principles. Lastly, the spectrometer's ability to withstand the operating conditions of a school is of high importance, i.e., it should be possible for students to handle the spectrometer without it suffering irreparable damage. As a result, the required spectroscopic hardware needs to be low-cost and versatile, thus enabling different applications and modes of operation using one and the same instrumental setup.

The subject of UV-VIS spectroscopy is also of high interest to hobbyists and tinkerers due to its numerous and, at the same time, diverse applications, e.g., in water analysis or astronomy (spectroscopic analysis of gases in galaxies). The invention of 3D printers, table-top laser cutters and minicomputers opened up new possibilities to realize high-tech instruments at home and led to an international movement, the so-called Maker movement (see section 3.1). Today, plenty of diverse do-it-yourself spectrometers can be found in the world-wide web. Projects range from a simple application of measuring the spectrum of the sun or light bulb to sophisticated high-resolution spectrometers that allow for the measurement of the Fraunhofer lines. It is noteworthy, that the specifications of the Maker hardware instruments partially overlap with the ones of the educational sector: costs, flexibility and wide range of applications.

In extracurricular education, UV-VIS spectroscopy plays just as important a role as in regular education due to its universal relevance in natural sciences. Extracurricular education includes offers for pupils, such as project weeks or pupil research groups, and offers for students or interested individuals outside the Maker movement, such as open research labs. Since content-related specifications do not bind these extracurricular offers, the topic of spectroscopy can be addressed within its entire scope. Thus, not only applications of the spectrometer but also the fundamental physics principles of operation are covered. This, in turn, emphasizes the specific requirements for spectroscopic hardware in this application field. It must allow for as many areas/applications of UV-VIS spectroscopy to be covered as possible, as well as applications in schools or the maker movement. These areas cover different methods (e.g., transmission and reflection spectroscopy) and different precision levels within these areas (e.g., colorimeter vs. atomic spectroscopy). Beyond the hardware's flexibility, pupils/students must be able to work and experiment independently after a short instruction, enabling formats such as practical training and open research labs to function optimally. Finally, the hardware needs to withstand the environmental conditions in the context of education (location, users, transport) without breaking down.

In addition to the three fields of spectroscopy applications, university education bears the most substantial relationship to actual scientific research. Here, practical training can be utilized within a variety of topics [2], that consequently requires the largest flexibility of spectrometers and their specifications. While in fields such as chemistry and biology, spectroscopy is used more as a "means to an end", in physics, special attention is paid to the fundamental principle of operation. Many applications in modern research, such as analytics, kinetic studies, or atomic spectroscopy, require an exceptionally high spectral resolution (e.g., FWHM e.q. or below

1 nm), a wide spectral range (e.g., from 300 nm up to 1000 nm) and/or a dynamic range of the detector system in use. Furthermore, especially in the field of physics, the understanding of the spectrometers' functionality is of importance. Thus, the possibility to inspect the optical setup and individual components is necessary.

Due to the usually high acquisition costs of commercially available spectrometers, several efforts have been made in recent years to develop DIY spectrometers for various applications in these target groups [5–22]. While some of these spectrometers relied on the use of low-cost LED technology [5–10, 12–16, 18–22], other setups automated signal detection using smartphone cameras [6, 7, 11, 14, 16–22]. Despite this extensive body of literature, there is still a lack of experimental setups aiming at high-resolution spectroscopy to detect absorption, reflection, and emission lines and/or to investigate different spectral detection windows. In more detail, nearly no DIY setup is available featuring system specifications close to laboratory equipment, whether concerning the internal structure (usually a Czerny-Turner configuration [23] is used) of the spectrometer or its spectral resolution. Without such equipment, users of those spectrometers are unable to assign emission lines to particular electronic levels or to start up research work by themselves at an appealing level.

State-of-the-art mediation formats: In order to make the DIY high-end spectrometer based on Open Hardware accessible to the target group of school education, the mediation format must present the spectrometer comprehensively in its entirety, allowing it to be used effectively in different mediation formats (be it teaching according to the curriculum or the development of a novel teaching format). It includes the general principle of operation, the components used and their corresponding sources, and detailed assembly instructions, enabling science teachers to construct and implement the spectrometer independently. Furthermore, the functional scope of the system must be presented using examples (experiments) relevant to teaching, e.g., transmission measurements and the use of the Lambert-Beer-Law, measurements of atomic lines or reflection measurements using solid materials, in order to provide the teacher with experimental examples that can be implemented immediately. To get noticed by as many people as possible in the field of school education and at the same time provide all the necessary information, the long-established format of the article (a paper) in a journal of science education is ideally suited.

In contrast to the educational sector, a publication in a journal is only sometimes suitable to sufficiently serve the target group of Makers. Contrary to a science teacher, only some Makers can be expected to have the fundamental physics or spectroscopic knowledge necessary for setting up, adjusting, and experimenting with a high-end DIY spectrometer. In addition to detailed assembly instructions and component lists with sources of supply, it is therefore also necessary to convey the required fundamental physics and technical information. Furthermore, next to experimental examples, e.g., how to determine atomic lines and how to perform a wavelength calibration, additional research and experimental ideas, e.g., increasing the spectral resolution or changing the area of application, should be proposed to underline the versatility and application areas of optical spectroscopy to both experienced and inexperienced Makers. This information should be conveyed in a format that cannot only package the broad spectrum of information in a meaningful and targeted manner but is also already established and accepted in the Maker movement. Due to the high flexibility of the framework and the contents of a book

in combination with the already established relevance of books providing the Maker movement with information and projects, a sophisticated book for Makers on the topic of high-end DIY spectroscopy is ideally suited to this context.

Since the topics dealt with in the context of optical spectroscopy in the areas of extracurricular education and university teaching are very versatile and generally do not follow a direct, superordinate curriculum, neither the format of the paper nor the format of the book is sufficient to cover all needs. The lack of a standardized curriculum and the heterogeneity of the participants, especially in the field of education, requires all materials (the hardware provided or specialized information) to be adapted specifically for the tasks/experiments and the recipients. In addition, formats on specialized topics, such as high-end spectroscopy, are usually bound to a fixed, relatively short time frame, e.g., five to eight hours over one to two weeks. Furthermore, especially in the context of extracurricular education, it is not necessarily possible to employ the format at one fixed location due to spatial distances. The same problem has also arisen for university teaching in the context of the COVID-19 pandemic [24] at the latest. Therefore, a format that can meet all the challenges arising from these conditions and restrictions is needed. In this context, a novel practical training, which conveys the topic of high-end spectroscopy experimentally ("hands-on"), independent of location and context, optimized for the participants and their specific given time frame, promises to fulfill these needs.

In the context of novel mediation formats for optical spectroscopy, a brief evaluation of these formats has to be carried out to gain insight into their impact and acceptance. Furthermore, it is necessary to evaluate the newly developed hardware used in established and novel formats concerning its handling and, much more critically, in terms of the effect on the respective users.

Focusing on the format itself, it is essential to examine the extent to which the participants of such a format evaluate the framework conditions and general conditions of the format compared to conventional (established) practical training formats. This includes, in particular, the location at which the practical training was carried out, the nature of the tasks and problems, and time aspects.

Beyond the format evaluation, however, the impact evaluation of the high-end DIY spectrometer is of utmost importance, especially concerning its use in an educational setting (school, extracurricular, or university). Therefore, it is crucial to examine the relevant aspects of the spectrometer as comprehensively as possible. This includes the exclusively hardware-related aspects, such as the setup and subsequent handling of the entire system. Furthermore, more complex concepts such as trust in the measuring system, personal feelings in working with the spectrometer, understanding, and self-confidence in dealing with the spectrometer must be examined. Moreover, it is essential to investigate how the spectrometer influences personal characteristics, such as the ability-self-concept or current motivation.

The thesis is organized as follows: The second chapter presents two articles that enable teachers in schools and universities to perform high-end spectroscopy with pupils/students using an Open Hardware based DIY system. In the third chapter, a new volume of the book series "1,000 Laser Hacks for Makers" (translated from the German original title "1,000 Laser-Hacks für Maker") is presented, which enables Makers to perform high-precision spectroscopy without the need for specialist knowledge. Afterward, a format targeting extracurricular education in the context of high-end DIY spectroscopy is described before a format is presented that primarily targets university education to enable the students to build experimental setups, such as a high-end DIY spectrometer, independently and problem-oriented [25] with the help of this scientific

question. Lastly, the practical training format described in previous chapters and the high-end DIY spectrometers covered in all formats are evaluated. In this context, the practical training and its framework conditions are tested, while the measurement system is examined in detail about its effect on the users. To achieve these, two studies are described, a pilot interview study and a subsequent questionnaire study based on the prior studies' results.

In the sixth chapter of this thesis, the conclusions on the individual formats and the studies conducted are drawn before the findings of this thesis are concluded and summarized in the last two chapters.

2. High-end DIY spectroscopy for teaching natural sciences

The subject of spectroscopy plays an integral role in the education of high school and college students in science. The areas of spectroscopy application range from transmission to reflectance and fluorescence spectroscopy to atomic spectroscopy. In order to be able to teach these topics directly with the help of an experiment, a spectrometer is indispensable. These topics can be taught experimentally with the help of commercially available high-end spectrometers, but these spectrometers are characterized not only by their comparatively high acquisition costs, but also by the fact that they are so-called "black box systems".

In order to achieve the greatest possible didactic added value in the treatment of these topics, it is of great importance to carry out experiments "hands on" on an open spectrometer, so that the mode of operation and the underlying physical principles of operation of the spectrometer can be optimally conveyed. At the same time, however, such a "hands on" spectrometer must deliver the same precision as commercial alternatives, so that the experimental investigation of topics that require the highest degree of precision (e.g., atomic spectroscopy) can still be carried out.

In this context, the two papers presented in the following sections introduce a "hands on" high-end DIY spectrometer to the educational community to make it available to as many potential users as possible.

2.1. A do-it-yourself Czerny–Turner spectrometer: atomic emission, absorption, reflection, and fluorescence spectroscopy in natural sciences

The author contributed to the paper *A do-it-yourself Czerny–Turner spectrometer: atomic emission, absorption, reflection, and fluorescence spectroscopy in natural sciences*. The paper is printed with friendly permission of IOP Publishing Limited.

OPEN ACCESS

PAPER

Phys. Educ. 57 (2022) 065012 (11pp)

iopscience.org/ped

A do-it-yourself Czerny–Turner spectrometer: atomic emission, absorption, reflection and fluorescence spectroscopy in natural sciences

Mattis Osterheider¹ , Bjoern Bourdon¹ ,
Rasmus Boettcher¹, Marco Beeken² and Mirco Imlau^{1,*} 

¹ Department of Physics, University of Osnabrueck, Barbarastrasse 7, D-49076 Osnabrueck, Germany

² Department of Chemistry and Biology, University of Osnabrueck, Barbarastrasse 13, Osnabrueck, D-49076, Germany

E-mail: mirco.imlau@uni-osnabrueck.de



Abstract

Spectrometers play a decisive role in the education of A-level and/or under-graduate students in the field of natural sciences. They are capable to demonstrate atomic emission, transmission, reflection and fluorescence spectra, but can be used for wavelength filtering, as well. Here, we present a do-it-yourself spectrometer setup based on a Czerny–Turner design that (a) can be used for all measurement types with one and the same setup and (b) is capable to spectrally resolve atomic emission lines. We use LEGO[®] bricks for the optomechanical construction and combine it with affordable, but high-quality optical components and linear array based on a charge-coupled device (CCD). A modular design is implemented and allows for a quick

* Author to whom any correspondence should be addressed.



Original Content from this work may be used under the terms of the [Creative Commons Attribution 4.0 licence](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Any further distribution of this work must maintain attribution to the author(s) and the title of the work, journal citation and DOI.

1361-6552/22/065012+11\$33.00

1 © 2022 The Author(s). Published by IOP Publishing Ltd

M Osterheider *et al*

change between the various measurement techniques, but also fosters the technological understanding of the underlying systems' optical design.

Keywords: UV–VIS spectroscopy, Do-it-Yourself, undergraduate, A-level, natural sciences, high resolution, modular

1. Introduction

Optical spectroscopy is an indispensable topic in scientific education for A-level and undergraduate students. On the one hand, the quantum theoretical principles of light–matter-interaction [1] can be experienced by means of atom line emission and absorption. On the other hand, a proper knowledge about the information that can be derived from the spectra of molecules and solid states [2] can be learned and is a mandatory prerequisite for starting-up in life sciences, physics, chemistry and many further research fields including cross- and interdisciplinary activities.

The pedagogical benefit of teaching the principles of modern spectroscopy by utilizing simple and modular photometers or spectral photometers has been reported, before [3–5]. Accordingly, a multitude of hands-on-experiments can be found in literature, most of them as do-it-yourself (DIY) setups with light-emitting diodes (LEDs) at low and moderate costs [3–19]. Some of the setups use digital or cell phone cameras for spectral detection [3, 5–7, 10, 11, 15, 18–21]. Most of them are developed for a specific application and measurement technique. The major weakness of these setups, however, is their limited spectral resolution. It limits the amount of information that can be derived from absorption and/or emission lines and may prevent first research experiences of students. Moreover, there is a risk that the basic principles of optical spectroscopy may remain unexplored, i.e. the pedagogical benefit may not occur.

We here introduce a DIY optical setup that (a) addresses the aspect of high-resolution spectroscopy, (b) can be applied for studies in different spectral windows at different spectral resolutions and (c) can be used either as atomic line emission, absorption, reflection or fluorescence spectrometer with one and the same system. Remarkably, the setup still is by about a factor of ten less expensive compared with commercial spectrometers of equivalent specifications and can be operated without in-depth instruction

and preparation. It is thus very well suited for educational purposes.

2. Basic optical design in the context of teaching

The features of our system (cf figure 1(a)) are achieved by an optical design based on a Czerny–Turner (C–T) spectrograph [22], which is distinguished by self-correction of optical imaging errors. In addition, only a few optical components are required: a set of confocal mirrors (CM1, CM2), a reflective diffraction grating (RG) and an entrance slit (ES). Detection is realized by a CCD line-array or a projection screen. An LED serves as light source (LS) for transmission, reflection and fluorescent measurements (cf figures 1(a)–(d)).

The optical design of the C–T spectrograph may be the topic of a first teaching unit in spectroscopy. Following the light path, topics of fundamental optics are revisited: light passing the entrance slit ES (\rightarrow *diffraction at a single slit*) is collimated via the first confocal mirror CM1 (\rightarrow *lens equations*) onto a reflective diffraction grating RG (\rightarrow *Bragg condition of gratings*). The angular distribution of the diffracted light represents the spectral components of the incident light (\rightarrow *dispersion of light*), is collected by the second confocal mirror CM2 and finally projected into the image plane (\rightarrow *imaging optics*). Here, the spectral components are spatially separated from each other (\rightarrow *spectral resolution*), so that the signal intensity as a function of photon energy (\rightarrow *spectrum*), can be inspected by eye using a projection screen or electronically using a linear sensor array (CCD). Demand lessons may focus on the beam paths of the two confocal mirrors that are mirror-symmetric to each other in order to correct for optical errors (in particular for astigmatism related with the small tilt in the respective beam paths). A second teaching lesson may address the relation between spectral resolution and parameters of the

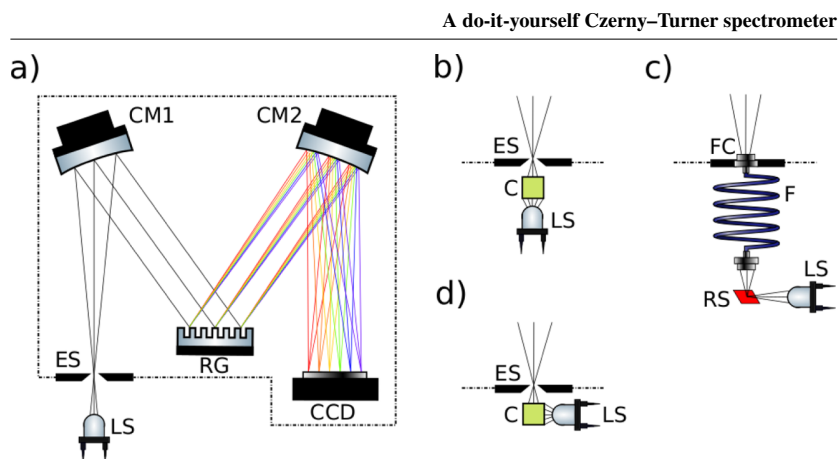


Figure 1. (a) Scheme of the DIY Czerny–Turner spectrograph for atomic emission spectroscopy: LS: light source (e.g. mercury vapour lamp); ES: entrance slit; CM1, 2: confocal mirrors; RG: reflective diffraction grating. The dashed line marks the lightproofed housing. (b) Setup change for transmission (C: sample cuvette), (c) reflection (FC: optical fibre coupling, F: optical fibre, RS: reflective sample), and (d) fluorescence measurements.

optical components, such as its inverse dependence on the width of the ES. The impact of doubling the focal length of CM1 and CM2 on the spectral resolution, as well as the role of light intensity on the CCD line array are well suited for a jigsaw classroom.

3. Assembly and components of the setup

Figure 2 shows a photograph of the major optical unit of the DIY C–T spectrometer. The mechanical structures of all components are built from commercial LEGO® bricks. The entire setup is mounted onto a LEGO® baseplate (alternatively, an optical breadboard [23] is used if the spectrometer has to be portable). Further components used are listed in table 1.

The confocal mirrors are purchased from a professional supplier of optical components, while the reflective diffraction grating is prepared from a commercial compact disc (CD). It features >85% reflectivity and groove distance accuracy (groove distance $d = 1.6 \mu\text{m}$, $625 \text{ lines mm}^{-1}$) for the spectrometer. The ES is realized by two razor blades at adjustable distance (μm range). The CCD detector is based on a line scan camera

module with a Toshiba sensor array (type 1304) and obeys a USB serial port for direct connection to a computer as well as a plug-and-play software for live view of the pixel values [24]. Note, that the Toshiba sensor is a standard in professional high-end spectrometers. The costs of the DIY C–T spectrograph accumulates to a maximum of about 500 Euros. Costs can be considerably reduced if students bring together most of the LEGO® bricks.

An end-to-end instruction with a detailed part lists of the LEGO® bricks is available open online, free of charge [25] (license: Creative Common 4.0 (CC BY-SA 4.0)) and was sketched using the open source software LDraw [26] and LPub3D [27] (Hardback edition: [28]).

4. Classroom experiences

4.1. Atom emission spectroscopy

A key application of the spectrometer is the application of the Bohr–Einstein frequency-relation for an optical transition in an atomic system

$$\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu = E_{\text{photon}} \quad (1)$$

M Osterheider *et al*

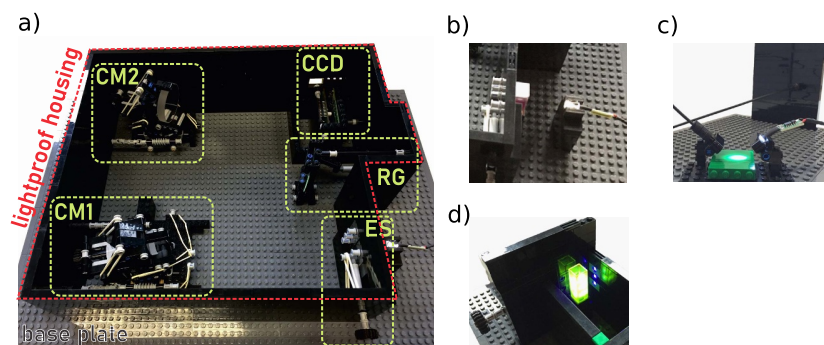


Figure 2. Photograph of the (a) major optical unit of the DIY Czerny–Turner spectrometer build from LEGO® bricks. The entrance slit is on the bottom right, the two confocal mirrors on the left and the CCD line array on the upper right (cf marks). (b) A close up of the entrance slit with adjustments for transmission measurements, (c) a close up of fibre coupling for reflection measurements and (d) a close up of the entrance slit with adjustments for fluorescence measurements.

Table 1. Optical and electronic components used in the spectrometer in reference to the online shops: www.amazon.de; www.thorlabs.de; www.eureca-messtechnik.de; www.conrad.de.

Component	Article	Distributor	Article number/ASIN
ES	Platinum razor blade	Amazon	B07KMKNHBR
CM1	1 Dielectric concave mirror 400–750 nm, $f = 200$ mm	Thorlabs Ltd	CM254-200-E02
CM2	2 Dielectric concave mirror 400–750 nm, $f = 200$ mm	Thorlabs Ltd	CM508-200-E02
RG	Intenso compact disc-RW 700 MB	Amazon	B000BV7AWE
CCD	Line scan camera module	EURECA Messtechnik GmbH	e9u-LSMD-TCD-1304-STD

using the spectrum of a 60 W mercury vapour light bulb (setup depicted in figure 1(b)). Here, E_{photon} the photon energy of the incident light of frequency ν , h the Planck constant, and $E_{1,2}$ are two discrete energetic levels of the Hg atom with energy distance ΔE . For this purpose, the ES is narrowed to achieve the best possible spectral resolution. Figure 3 shows a typical line spectrum detected with the spectrometer and a CD as reflective diffraction grating.

A possible task for the students is to allocate the individual emission lines with atomic transitions of Hg as published in the literature and to calibrate the CCD line array, i.e. to assign a wavelength to each detector pixel. The inset of figure 3 depicts the magnified atomic Hg emission

line at about 546 nm that is used to determine the full line width at the half value of the peak maximum (FWHM). The comparison with literature data (cf table 2) acts as starting point for a joint discussion of the students about measurement errors, error sources, and ways for optimizing the spectrometers precision. In a demand lesson (optional) a more precise calibration routine can be discussed based on a polynomial function of third order. The data of figure 3 reveal a wavelength spacing ($\Delta\lambda/\text{pixel}$) of (0.06 ± 0.01) nm/pixel. Note that the inaccuracy of the peak position for the emission line at approx. 404 nm is by a factor of approx. 10 larger compared to the other peak position uncertainties. The reason for this is that only a small wavelength range (in this case centred

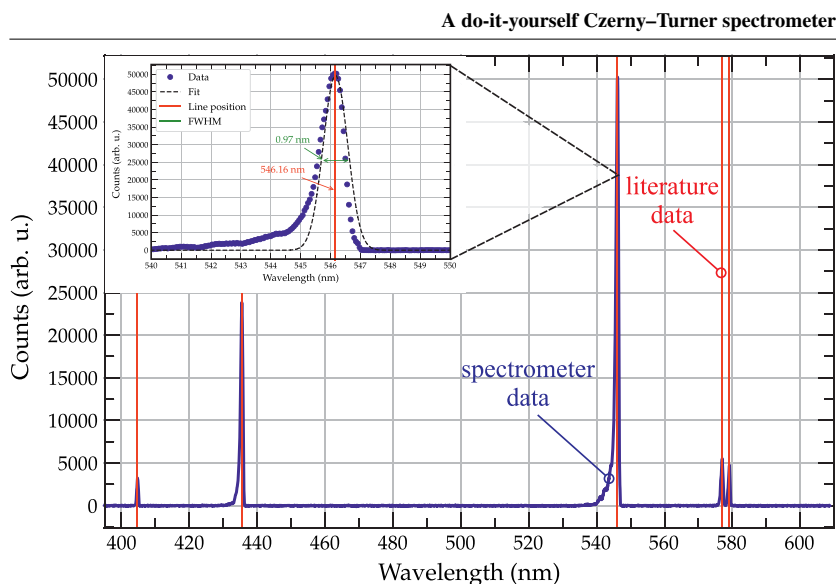


Figure 3. Atomic emission spectrum of a mercury vapour lamp as measured with the DIY Czerny–Turner spectrometer. Data points (blue), literature peak positions of atomic emissions (red). Inset: magnified peak of the emission line at 546.0735 nm (literature value, entrance slit approx. $80\ \mu\text{m}$). Gaussian fit to the data (black dotted line).

Table 2. Literature values of mercury emission line peak positions [29] in comparison to the determined peak positions and FWHM with their respective measurement errors.

Peak position: literature (nm)	Peak position: measured (nm)	FWHM (nm)
404.6563	(404.74 ± 0.12)	(0.56 ± 0.29)
435.8328	(435.41 ± 0.02)	(0.86 ± 0.05)
546.0735	(546.02 ± 0.01)	(0.98 ± 0.01)
576.9598	(576.93 ± 0.01)	(0.76 ± 0.21)
579.0663	(579.05 ± 0.01)	(0.61 ± 0.22)

at 580 nm) can be sharply imaged due to the grating properties in particular its curvature. As a consequence, the chromatic aberration increases with increasing distance to this wavelength. This aberration in combination with a small peak amplitude leads to a higher uncertainty in the fit and subsequently in the emission line peak position.

Note, that the DIY C–T spectrometer reveals a spectral resolution by a factor of at least 15 higher in comparison with previously reported self-made spectrometers (typically ranging from approx. 15–37 nm [6]). By utilizing a different

grating, e.g. a blaze grating (article number GR25-1205, Thorlabs Inc.), it becomes possible to further increase the spectral resolution and especially the signal sensitivity.

4.2. Transmission, reflection and fluorescence spectroscopy

Figure 4 shows the measurement results obtained for determining (a) the transmission spectrum of potassium permanganate KMnO_4 (part (a) and (b)), (b) the fluorescence spectrum of fluorescein

M Osterheider *et al*

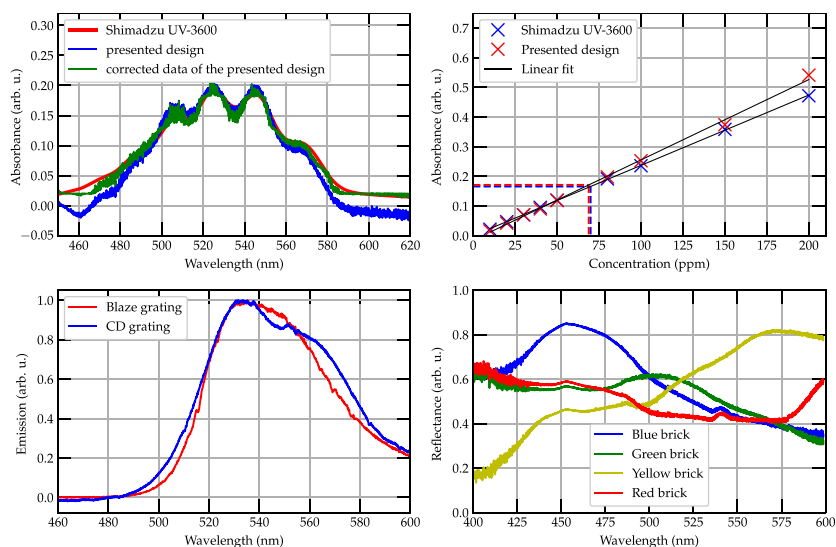


Figure 4. Classroom examples of the spectrometer. Top left: absorption spectra of potassium permanganate at a concentration of 80 ppm using the DIY Czerny–Turner spectrometer before (blue data points) and after (green data points) correction for the nonlinear signal response of the CCD sensor. For comparison, the spectrum measured with a high-end spectrometer (Shimadzu UV-3600, red data points) is plotted. Top right: absorbance as a function of concentration at 525 nm as being determined from the spectra of a series of potassium permanganate solutions. The calculated concentration of the unknown sample is marked with dotted lines. Bottom left: normalized emission spectra of fluorescein under exposure to UV light using a CD grating (blue) or blaze grating (red). Bottom right: reflection spectra of different coloured LEGO® bricks (blue, green, yellow and red).

and (c) the reflectance spectra of four differently coloured LEGO® bricks with the DIY C–T spectrometer—all of them possible in the framework of teaching lessons. For the individual measurements, the spectrometer setup was rebuilt and experimentally prepared within less than 5 min in each case, i.e. it can be rebuilt in the breaks between teaching lessons. All three measurements are directly related with applications as described in the following.

4.2.1. Transmission spectroscopy. The KMnO_4 transmission spectrum (figure 4 (top left)), shown for a concentration $c = 80$ ppm is used in analytical chemistry courses to learn how an unknown concentration of a solution can be revealed. For this purpose, the students prepare a series of KMnO_4 solutions in purified water with

concentrations in the range of 0, 10–200 ppm and fill it into a cuvette. A white light LED (cf. table 3) is used for illumination according to figure 2(b). They start to measure the transmitted intensity spectrum of purified water $I_0(\lambda)$ using the solution with $c = 0$ ppm. Then, the transmitted spectra $I_t(\lambda)$ are measured for each concentration and the spectral absorbance $\alpha(\lambda)$ is determined using Lambert–Beer’s-law:

$$I_t(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot \exp - (\alpha(\lambda) \cdot d). \quad (2)$$

Here, d is the sample thickness along the direction of light propagation. Parallel to the analysis, the students may be motivated to discuss about the normalization procedure based on $I_0(\lambda)$ with the goal to understand that losses by cuvette and solvent are removed. Now, the absorbance is plotted as a function of concentration for a

A do-it-yourself Czerny–Turner spectrometer

Table 3. Components for transmission measurement in reference to the online shops: www.carlroth.com; www.conrad.com.

Component	Article	Distributor	Article number/ASIN
C	One use cuvette PMMA, Makro 2.5–4.5 ml	Carl Roth GmbH + Co. KG	Y196.1
LS	2 TRU COMPONENTS LED white $d = 5$ mm, 5000 mcd	Conrad Electronics SE	1573733

Table 4. Components for fluorescent measurement in reference to the online shops: www.carlroth.com; www.conrad.com.

Component	Article	Distributor	Article number/ASIN
C	One use cuvette PMMA, Makro 2.5–4.5 ml	Carl Roth GmbH + Co. KG	Y196.1
UV-LS	2 TRU COMPONENTS LED white $d = 5$ mm, 5000 mcd	Conrad Electronics SE	1573733

selected wavelength (preferred at one of the maxima of the spectra, e.g. 525 nm), as depicted in figure 4 (top right). A linear fit serves as calibration function for the determination of a KMnO_4 solution prepared by another group of students with unknown concentration.

Figure 4 (top left) also shows a spectrum of the DIY C–T spectrometer after correction for the nonlinear response of the CCD line array. For comparison, the spectrum of the same sample determined with a high-end spectrometer (type UV-3600 from Shimadzu) is plotted.

4.2.2. Fluorescence spectroscopy. Figure 4 (bottom left) shows the emission spectrum of a fluorescein solution (0.02% in purified water) that was determined using the principle setup depicted in figure 1(d). As for transmission measurements, the solution needs to be illuminated. In this case, however, an ultraviolet LS build of three 375 nm UV LEDs is used and the direction of exposure is orthogonal to the ES (cf. table 4).

An accompanying teaching lesson may address the difference between absorption and (spontaneous) emission according to Einstein’s principle of light–matter interaction. As a result the students shall find-out the idea behind increasing the light power, choosing UV light and changing the direction of light propagation, i.e.

excitation is required as additional step in emission spectroscopy. A topic for demand lessons is the conclusion of a lower photon energy of the emitted light in comparison with the excitation light that results in a major emission peak at about 535 nm.

Measuring fluorescence with a spectrometer also proves to be more challenging than the measurement of a transmission spectrum from the experimental viewpoint. The reason is that the light emitted by the fluorescein solution is weak due to a low conversion efficiency ($\ll 1$) of excitation and emission as well as due to diffusive emission. Figure 4 (bottom left) therefore shows the fluorescence spectrum of the fluorescein solution using two different reflective diffraction gratings: (a) the CD (blue data points) and (b) a blaze grating (red data point, blaze wavelength $\lambda_B = 500$ nm, 300 lines mm^{-1} , Thorlabs Inc. article number: GR25-0305). The latter reveals the fluorescein spectrum in full accordance with literature [30–32]. Note, that spectrum with the CD also reflects the majority of fluorescein emission features but shows a small dip at about 550 nm, that is a result of the absorption characteristics of the re-recordable CD itself. Students may study the relation of this dip to the grating by measuring the same spectrum subsequently with CDs from different distributors (also read-once, read-many, read-write media shall be compared).

M Osterheider *et al*

Table 5. Components for reflection measurement in reference to the online shops: www.bricklink.com; www.amazon.com; www.conrad.com.

Component	Article	Distributor	Article number/ASIN
FC	Fibre optical coupler ('Spaltersatz')	Bricklink	See [25] for article numbers
F	iVANKY optical cable, Toslink cable, 1.8 m optical audio cable	Amazon	IVANKY-OC01
LS	2 TRU COMPONENTS LED white $d = 5$ mm, 5000 mcd	Conrad Electronics SE	1573733

4.2.3. Reflection spectroscopy. Figure 4 (bottom right) depicts the result of reflection spectra recorded for four LEGO® bricks of different colour. Here, the ES of the spectrometer is exchanged by a fibre optical (cf. table 5) coupler equipped with an optical fibre (figure 1(c)) to enable spectral detection at an angle according to the law of reflection. The white light LED is again used to illuminate the LEGO® bricks (45° angle of incidence).

A reference spectrum $P(\lambda)_{\text{reference}}$ is recorded using a white LEGO® brick, so that the reflectance $R(\lambda)$ can be calculated for the measured spectra $P_{\text{sample}}(\lambda)$ of each coloured brick using the relation [33]:

$$R(\lambda) = \frac{P(\lambda)_{\text{sample}}}{P(\lambda)_{\text{reference}}}. \quad (3)$$

The results can be used in the classroom to discuss the possibility of automatic detection of plastic of different types in the context of waste separation, recycling, environment protection and micro plastics—one of the major applications of spectroscopy in these fields.

5. Conclusion and summary

We can conclude that it is possible to construct a DIY C–T spectrometer that matches the demands of classroom teaching in natural sciences and features a spectral resolution and sensitivity for atomic line emission spectroscopy using LEGO® bricks. The spectrometer thus represents another example of optics/photonics instruments/setup that can be realized with this approach and extends the series of educational setups from Michelson-interferometer [23], holographic recording setup [34], optical tweezer [25], laser powermeter [35] up to an intra-cavity, frequency-doubled Nd:YAG laser system [25]. From the technical viewpoint,

the setup profits from the mechanical precision of the LEGO® bricks as a result of the superior competence of LEGO® systems A/S in the injection moulding technology. In the classroom, the use of LEGO® bricks is a major motivation factor for students, but the teaching lesson also profits from the distributed knowledge in mechanical building with LEGO®.

Another important feature for classroom applications is its quick and easy modularity, i.e. to the possibility to use the DIY C–T spectrometer for emission line, transmission, fluorescence and reflection spectroscopy. Thus, the setup is either well matched with the teachers' needs and boundary conditions of the day-to-day business, in particular taking short (minute-range) lesson preparation times into account. In addition, it turns out that the modularity also opens-up applications in rather different courses, disciplines and topics, ranging from physics, chemistry, biology, life sciences and related cross- and interdisciplinary topics. Here, the direct link with many state-of-the-art socio-economic applications shall be added besides the precision of fit with the curricula of modern natural sciences. But also the fact that one and the same system can be used by different teachers is not insignificant considering joined knowledge in handling and maintenance.

Finally, the low price of the DIY C–T design is striking for the application in many schools, thus, securing the hands-on experience of many students (world-wide) in spectroscopy.

To sum up, the presented DIY C–T spectrometer has the potential of becoming a workhorse in schools for the natural sciences. It combines modularity, high spectral resolution and sensitivity, supports students' motivation, matches with the teachers' needs, while remaining affordable to a large number of educational institutions.

A do-it-yourself Czerny–Turner spectrometer

Data availability statement

The data that support the findings of this study are available upon reasonable request from the authors.

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge discussions with Karsten Sengebusch and Juergen Beckers (Eureca Messtechnik GmbH), and Volker Bombien (Bombini Verlags GmbH, www.bombini-verlag.de).

Funding

This work was funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) within the funding program ‘Photonics Research Germany’ with Contract Number 13N15230 (project acronym: optocubes) and the ministry of science and culture (MWK) of lower saxony within the funding program ‘InnoPlus’. The authors are responsible for the contents of this publication.

ORCID iDs

Mattis Osterheider <https://orcid.org/0000-0001-6121-0210>
 Bjoern Bourdon <https://orcid.org/0000-0002-4559-4522>
 Mirco Imlau <https://orcid.org/0000-0002-5343-5636>

Received 24 March 2022, in final form 27 July 2022
 Accepted for publication 17 August 2022
<https://doi.org/10.1088/1361-6552/ac8a85>

References

[1] Einstein A 1917 Zur Quantentheorie der Strahlung *Phys. Z.* **18** 121–8
 [2] Gauglitz G and Moore D S (eds) 2014 *Handbook of Spectroscopy* (Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA)
 [3] Bougot-Robin K, Paget J, Atkins S C and Edel J B 2016 Optimization and design of an absorbance spectrometer controlled using a Raspberry Pi to improve analytical skills *J. Chem. Educ.* **93** 1232–40
 [4] Adams-McNichol A L, Shiell R C and Ellis D A 2019 Accurate, photoresistor-based, student-built photometer and its application

to the forensic analysis of dyes *J. Chem. Educ.* **96** 1143–51
 [5] Scheeline A 2010 Teaching, learning and using spectroscopy with commercial, off-the-shelf technology *Appl. Spectrosc.* **64** 256A–268A
 [6] Grasse E K, Torcasio M H and Smith A W 2016 Teaching UV–Vis spectroscopy with a 3D-printable smartphone spectrophotometer *J. Chem. Educ.* **93** 146–51
 [7] Hosker B S 2018 Demonstrating principles of spectrophotometry by constructing a simple, low-cost, functional spectrophotometer utilizing the light sensor on a smartphone *J. Chem. Educ.* **95** 178–81
 [8] Vanderveen J R, Martin B and Ooms K J 2013 Developing tools for undergraduate spectroscopy: an inexpensive visible light spectrometer *J. Chem. Educ.* **90** 894–9
 [9] Knagge K and Raftery D 2002 Construction and evaluation of a LEGO spectrophotometer for student use *Chem. Educ.* **7** 371–5
 [10] Yu H, Tan Y and Cunningham B T 2014 Smartphone fluorescence spectroscopy *Anal. Chem.* **86** 8805–13
 [11] Albert D R, Todt M A and Davis H F 2012 A low-cost quantitative absorption spectrophotometer *J. Chem. Educ.* **89** 1432–5
 [12] Pokrzywnicka M, Koncki R and Tymecki Ł 2010 A concept of dual optical detection using three light emitting diodes *Talanta* **82** 422–5
 [13] Asheim J, Kvittingen E V, Kvittingen L and Verley R 2014 A simple, small-scale LEGO colorimeter with a light-emitting diode (LED) used as detector *J. Chem. Educ.* **91** 1037–9
 [14] Wang J J, Núñez J R R, Maxwell E J and Algar W R 2016 Build your own photometer: a guided-inquiry experiment to introduce analytical instrumentation *J. Chem. Educ.* **93** 166–71
 [15] Happel O 2020 A DIY-LED-photometer in STEM-fields: basics and application examples from chemical to effect-related analysis *CHEMKON* **27** 287–94
 [16] Kvittingen E V, Kvittingen L, Melø T B, Sjursnes B J and Verley R 2017 Demonstrating basic properties of spectroscopy using a self-constructed combined fluorimeter and UV-photometer *J. Chem. Educ.* **94** 1486–91
 [17] Witte T, Hanemann S, Sommerfeld H, Temmen K and Fechner S 2020 DIY construction of a digital low-cost photometer for the chemistry classroom *CHEMKON* **27** 193–8
 [18] Wigton B T, Chohan B S, McDonald C, Johnson M, Schunk D, Kreuter R and Sykes D 2011 A portable, low-cost, LED fluorimeter for

M Osterheider *et al*

- middle school, high school and undergraduate chemistry labs *J. Chem. Educ.* **88** 1182–7
- [19] Kuntzleman T S and Jacobson E C 2016 Teaching Beer's law and absorption spectrophotometry with a smart phone: a substantially simplified protocol *J. Chem. Educ.* **93** 1249–52
- [20] Clippard C M, Hughes W, Chohan B S and Sykes D G 2016 Construction and characterization of a compact, portable, low-cost colorimeter for the chemistry lab *J. Chem. Educ.* **93** 1241–8
- [21] Kehoe E and Penn R L 2013 Introducing colorimetric analysis with camera phones and digital cameras: an activity for high school or general chemistry *J. Chem. Educ.* **90** 1191–5
- [22] Czerny M and Turner A F 1930 Über den astigmatismus bei spiegelspektrometern *Z. Phys.* **61** 792–7
- [23] Klomp maker S, Lager F, Bourdon B and Imlau M 2019 *Interferometer zum Selberbauen* (Bonn: Bombini Verlags GmbH)
- [24] Eureka 2021 Consulting and supply of OEM components (available at: www.eureca.de/1524-0-Zeilenkameras-von-Eureca.html) (Accessed June 2021)
- [25] Imlau Research Group 2021 Myphotronics (available at: www.myphotronics.eu/) (Accessed June 2021)
- [26] LDraw.org 2021 An LDraw™ editor for LEGO® style digital building instructions (available at: www.ldraw.org/) (Accessed June 2021)
- [27] Sandy T 2021 Lpub3d (available at: <https://trevorsandy.github.io/lpub3d/>) (Accessed June 2021)
- [28] Osterheider M, Böttcher R, Bourdon B and Imlau M 2021 *Atomspektren Selber Messen* (Bonn: Bombini Verlags GmbH)
- [29] NIST 2021 Strong lines of mercury (Hg) (available at: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Handbook/Tables/mercurytable2.htm>) (Accessed June 2021)
- [30] Klonis N and Sawyer W H 1996 Spectral properties of the prototropic forms of fluorescein in aqueous solution *J. Fluorescence* **6** 147–57
- [31] Sjöback R, Nygren J and Kubista M 1995 Absorption and fluorescence properties of fluorescein *Spectrochim. Acta A* **51** L7–L21
- [32] Shah S, Gryczynski Z, Chib R, Fudala R, Baxi A, Borejdo J, Synak A and Gryczynski I 2016 Demonstration of FRET in solutions *Methods Appl. Fluoresc.* **4** 015001
- [33] Demtröder W 2013 *Experimentalphysik 2* (Berlin: Springer)
- [34] Lager F, Klomp maker S, Bourdon B and Imlau M 2019 *Hologramme zum Selbermachen* (Bonn: Bombini Verlags GmbH)
- [35] Hausherr D, Osterheider M, Bourdon B, Lager F, Klomp maker S, Berben D and Imlau M 2022 *Laserleistung Selber Messen* (Bonn: Bombini Verlags GmbH)



Mattis Osterheider studied physics and chemistry for the teaching profession at high schools at the University of Osnabrück from 2014 to 2019. Following his studies, he started his PhD in the Department of Didactics of Chemistry at the University of Osnabrück before changing the PhD subject to ultrafast physics in April 2021. In addition to his work at the university, he works as a chemistry teacher at an Osnabrück high school.

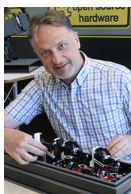


Björn Bourdon studied physics at the University of Osnabrück from 2011-2016. Since his PhD in 2020 in the research group 'Ultrafast Physics' of Prof. Dr. Mirco Imlau, he completes his postdoc phase as project leader in the BMBF-funded project 'optocubes'.



Rasmus Böttcher studied mathematics and physics at the University of Osnabrück for the teaching profession at grammar schools. Following his studies, he completed his traineeship at the Studienseminar Braunschweig. He is currently a teacher of physics and mathematics at a high school in Braunschweig.

A do-it-yourself Czerny–Turner spectrometer



Mirco Imlau studied physics at the University of Cologne, wrote his doctoral thesis on the interaction of laser light with crystalline solid-state materials, and from 2002 specialized in the physics of (ultra-)short laser pulses within the framework of a junior professorship. He then held professorships at the University of Vienna and Université de Lorraine before being appointed Professor of Experimental Physics at the University of Osnabrück in 2008.



Marco Beeken studied chemistry and biology for the Gymnasiumlehrant in Oldenburg. After his doctorate in 2010 in the research group of Ilka Parchmann at the University of Oldenburg, he worked as a teacher in Rhauderfehn and Cloppenburg after his traineeship in Wildeshausen. Since 2018 he is professor for chemistry didactics at the University of Osnabrück.

2.2. Spectrometer build of LEGO[®]-bricks – innovations for classes in modern chemistry

The author contributed to the paper *Spectrometer build of LEGO[®]-bricks – innovations for classes in modern chemistry*. The paper is printed with friendly permission of John Wiley & Sons, Inc..



doi.org/10.1002/ckon.202100088

Spektrometer aus LEGO®-Bausteinen – Innovationen für den modernen Chemieunterricht

Mattis Osterheider,^{*,[a]} Bjoern Bourdon,^[a] Rasmus Boettcher,^[a] Mirco Imlau^{*,[a]} und Marco Beeken^[b]

Zusammenfassung: In diesem Artikel wird ein kostengünstiges Czerny-Turner-Spektrometer zum Selberbauen vorgestellt, das durch die Kombination von LEGO®-Bausteinen, professionellen Optiken und Detektoren den Systemspezifikationen professioneller Spektrometer für die Schule entspricht und z. T. übersteigt. Ein modulares Konstruktionskonzept erlaubt die Durchführung aller Spektroskopiemethoden, wie die Transmissions-, Reflexions- und Lumineszenzspektroskopie. Gezeigt werden experimentelle Aufbauten, Abläufe der Experimente und Erfahrungen im Unterricht. Anhand einer offlinefähigen, Python-basierten Webapplikation wird gezeigt, wie sich Spektroskopiemessdaten im Unterricht in kürzester Zeit auswerten lassen.

Sichworte: UV/Vis-Spektroskopie · Do-it-yourself (DIY) · LEGO®-Bausteine · MINT-Bereich

Spectrometer build of LEGO®-bricks – innovations for classes in modern chemistry

Abstract: This article presents a low-cost Czerny-Turner spectrometer for do-it-yourself construction, which corresponds to and partly exceeds the system specifications of professional spectrometers for schools by combining LEGO® building blocks, professional optics and detectors. A modular construction concept allows the implementation of all spectroscopy methods, such as transmission, reflection and luminescence spectroscopy. Experimental set-ups, procedures of the experiments and experiences in teaching are shown. Using an offline-capable, Python-based web application, it is shown how spectroscopy measurement data can be evaluated in the classroom in a very short time.

Keywords: UV/Vis spectroscopy · do-it-yourself · LEGO® · STEM-fields

1. Einleitung

Das Thema der Spektroskopie im ultravioletten (UV) und sichtbarem (Vis) Spektralbereich ist in den Oberstufenlehrplänen zentral verankert. In den meisten Kerncurricula der Oberstufe wird die UV/Vis-Spektroskopie zwar nicht mehr explizit gefordert (mit Ausnahme des Land Hessens [1]). Allerdings werden in den meisten Bundesländern damit eng verzahnte Themen, wie die Umwelanalytik, die Chemie von Farbstoffen, die Kinetik von Reaktionen und die Anwendung des Lambert-Beer'schen Gesetzes gefordert. Besonders erwähnenswert sind hier Experimente, wie z. B. die Ermittlung der Nitratbelastung von Gewässern im Bereich der Umwelanalytik, die Bestimmung des Zuckergehalts in verschiedenen Lebensmittel als Anwendung des Lambert-Beer'schen Gesetzes

oder die Untersuchung der Färbung von Indikatoren im Bereich der Säure-Base-Chemie. Die Vermittlung dieser Inhalte scheint ohne die Verwendung eines UV/Vis-Spektrometers nicht oder nur sehr eingeschränkt möglich zu sein. Aus Sicht des (engagierten) Chemielehrers ist zudem problematisch, dass die Anschaffungskosten der meisten für den Unterricht geeigneten UV/VIS-Spektrometer teuer sind und mit 2.000 € den Etat vieler Schulen übersteigt [2,3]. Ein weiterer Nachteil der erhältlichen UV-Vis-Spektrometer liegt in dem Aufbau der Systeme als „Black Box“, sodass eine Auseinandersetzung mit dem Messprinzip auf die rein theoretische Ebene in Form von Skizzen beschränkt bleibt.

Vor diesem Hintergrund wurden in den letzten Jahren eine Vielzahl an Do-it-yourself (DIY)- Fotometern und -Spektrometern entwickelt [4–7], die vor allem kostengünstiger (low-cost) aufgebaut werden können, aber auch als offene Messgeräte eine Auseinandersetzung mit dem Messprinzip ermöglichen. Nachteil der bisherigen kostenoptimierten Lösungen sind ein stark beschränktes Auflösungsvermögen und/oder die Beschränkung auf ein einzelnes Messprinzip. In diesem Beitrag verfolgen wir einen Lösungsansatz für diese Problemstellung in Form eines DIY-Spektrometers, das auf der Verwendung von LEGO®-Bausteinen und kommerziell erhältlichen Optiken und Detektoren beruht. Wir zeigen, dass es mit diesem Ansatz gelingt, ein Spektroskopiesystem für unterschiedliche Anwendungen und Themenbereiche im Chemieunterricht einschließlich Webapplikation zur Auswertung der Messdaten aufzubauen, ohne dabei die Vorzüge der Low-Cost-Spektrometer außer Acht zu lassen.

[a] M. Osterheider, B. Bourdon, R. Boettcher, Prof. Dr. M. Imlau
Universität Osnabrück
Fachbereich Physik
AG Ultrakurzzeitphysik
Barbarastraße 7
49076 Osnabrück
* E-Mail: mosterheider@uni-osnabrueck.de
mirco.imlau@uni-osnabrueck.de

[b] Prof. Dr. M. Beeken
Universität Osnabrück
Fachbereich Biologie/Chemie
AG Chemiedidaktik
Barbarastraße 7
49076 Osnabrück

© 2022 The Authors. CHEMKON published by Wiley-VCH GmbH. This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

2. Aufbau & Komponenten des Spektrometers aus LEGO®-Bausteinen

Das Design des Spektrometers aus LEGO®-Bausteinen (siehe Abb. 1) basiert auf einer Czerny-Turner-Konfiguration, die sich vor allem durch eine starke Verringerung/Reduktion optischer Abbildungsfehler (Astigmatismen) auszeichnet [8]. Die verwendete Konfiguration funktioniert dabei wie folgt: Die Lichtmenge, welche ins Spektrometer eintritt, wird über den Eingangsspalt reguliert. Das Licht, welches durch den Spalt hindurchtritt, wird vom ersten Spiegel parallelisiert und auf das Gitter reflektiert, welches das Licht in seine spektralen Bestandteile aufteilt. Anschließend wird das spektral aufgeteilte Licht vom zweiten Spiegel auf den Detektor fokussiert.

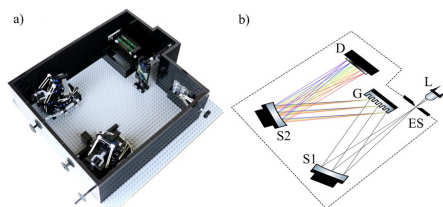


Abb. 1: Foto des aufgebauten LEGO®-Spektrometers ohne Deckel (a) und schematische Skizze (b) des Spektrometers mit Lichtquelle (L), zwei Spiegeln (S1, S2), einem Reflexionsgitter (G) und dem Detektor (D) und eingezeichnetem Strahlengang.

Sowohl die optischen als auch die elektronischen Bauteile werden in separaten, justierbaren Fassungen aus LEGO®-Bausteinen befestigt und montiert. Hierdurch entsteht eine komponentenweise Bauart, die einen schnellen Austausch einzelner Einheiten ermöglicht und die Anpassung des Spektrometers an unterschiedliche Messprinzipien ermöglicht. Die zugehörigen Bauanleitungen sind als offene Hardware auf der Website www.myphotonics.eu [9] lizenzkostenfrei hinterlegt. Zudem ist eine gedruckte Fassung als Taschenbuch mit dem Titel „Atomspektren selber messen“ [10] im Fachhandel erhältlich. Eine Übersicht über die verwendeten optischen und elektronischen Komponenten ist Tab. 1 zu entnehmen. Die Gesamtkosten belaufen sich auf ca. 500 €. Die Systemspezifikationen, welche mit diesen Komponenten erreicht werden können, sind in Tab. 2 aufgelistet.

Tab. 1: Optische und elektronische Komponenten des LEGO®-Spektrometers.

Komponente	Bauteil	Hersteller	Artikelnummer
Eingangsspalt	Rasierklingen	–	–
Kollimatorspiegel	Hohlspiegel	Thorlabs GmbH	CM254-200-E02
Fokusspiegel	Hohlspiegel	Thorlabs GmbH	CM508-200-E02
Gitter	Compact Disc	–	–
Detektor	CCD-Zeilenkammermodul	Eureca Messtechnik GmbH	e9u-LSMD-TCD-1304-STD
Lichtquelle	Kalkweiße LED	TRU Components	SE-50S-4080WC

Durch Variation der Komponenten lassen sich sowohl Systemspezifikationen als auch der Preis des Spektrometers flexibel auf die Anforderungen und Rahmenbedingungen in den jeweiligen Schulen anpassen. Zudem können LEGO®-Bausteine für die Dauer der Unterrichtseinheit aus dem Bestand der Schüler:innen zusammengetragen werden.



Mattis Osterheider studierte von 2014–2019 an der Universität Osnabrück die Fächer Physik und Chemie für das Lehramt an Gymnasien. Im Anschluss an sein Studium begann er seine Promotion in der Abteilung Didaktik der Chemie an der Universität Osnabrück, bevor er im April 2021 das Promotionsfach zur Ultrakurzzeitphysik wechselte. Neben seiner Tätigkeit an der Universität arbeitet er an einem Osnabrücker Gymnasium als Chemielehrkraft.



Björn Bourdon studierte von 2011–2016 an der Universität Osnabrück Physik. Seit seiner Promotion zum Dr. rer. nat. im Jahr 2020 in der Forschungsgruppe „Ultrakurzzeitphysik“ von Prof. Dr. Mirco Imlau absolviert er seine Postdoc-Phase als Projektleiter im BMBF-geförderten Projekt „optocubes“.



Rasmus Böttcher studierte an der Universität Osnabrück die Fächer Mathematik und Physik für das Lehramt an Gymnasien. Im Anschluss an sein Studium absolvierte er sein Referendariat im Studienseminar Braunschweig. Zurzeit ist er Lehrkraft für Physik und Mathematik an einem Gymnasium in Braunschweig.



Mirco Imlau studierte Physik an der Universität zu Köln, thematisierte in der Promotion die Wechselwirkung von Laserlicht mit kristallinen Festkörpermaterien und spezialisierte sich ab 2002 im Rahmen einer Juniorprofessur auf die Physik (ultra-)kurzer Laserpulse. Es schlossen sich Professuren an der Universität Wien und Université de Lorraine an, bevor er 2008 als Professur für Experimentelle Physik an der Universität Osnabrück berufen wurde.



Marco Beeken studierte Chemie und Biologie für das Gymnasiallehramt in Oldenburg. Nach seiner Promotion im Jahr 2010 im Arbeitskreis von Ilka Parchmann an der Universität Oldenburg war er nach dem Referendariat in Wildeshausen als Studienrat in Rhaderfehn und Cloppenburg tätig. Seit 2018 ist er Professor für Chemiedidaktik an der Universität Osnabrück.

TAGUNGSARTIKEL

Osterheider, Bourdon, Boettcher, Imlau, Beeken

Tab. 2: Systemspezifikationen des LEGO®-Spektrometers.

Spektroskopie	Wellenlängenbereich	400–700 nm (200 nm auf Detektor)
	Auflösungsvermögen	0,75 nm
	Integrationszeit	10 µs–71 min
Gitter	Gitterkonstante	1,6 µm
Detektor	Pixelzahl	3648
Optiken	Fokusteil	200 mm
Maße	Dimensionen	45 cm × 38,5 cm × 13,5 cm
	Gewicht	3587 g

Durch die hohe Flexibilität und die Möglichkeit, das System auf verschiedenste Anwendungsbereiche anzupassen, lassen sich jedoch einige Herausforderungen im Umgang mit dem System nicht vermeiden. Im Gegensatz zu kommerziell erhältlichen Spektrometern muss dieses zunächst aufgebaut werden (ca. 4 h) und anschließend fachgerecht justiert werden. Für die initiale Einrichtung des Systems muss somit etwas mehr Zeit, z.B. im Rahmen einer AG, eingeplant werden. Anschließend lässt sich das Spektrometer problemlos wie jede kommerzielle Alternative verwenden.

3. Einsatz im Chemieunterricht

Das Spektrometer aus LEGO®-Bausteinen lässt sich für verschiedene, teils sehr unterschiedliche Anwendungen im Chemieunterricht verwenden: von der klassischen Transmissionspektroskopie bis hin zur Untersuchung von Farbstoffen in Festkörpern mittels Reflexionspektroskopie.

3.1 Transmissions- bzw. Absorptionsmessungen verschiedener Lösungen

Experimente zur Transmissions- bzw. Absorptionsmessung einer gefärbten Lösung gehören zum Standardrepertoire der experimentellen Chemie in der Oberstufe und adressieren bspw. das Phänomen der Absorption oder die Bestimmung einer Lösungskonzentration mithilfe des Lambert-Beer'schen Gesetzes. Das Spektrometer aus LEGO®-Bausteinen lässt sich hierbei mit seiner Czerny-Turner-Konfiguration ohne weitere Modifikationen verwenden. Dazu wird eine Küvette mit der zu untersuchenden Probelösung vor dem Eingangsspalt des Spektrometers platziert (Abb. 2).

Als Lichtquelle eignet sich für Untersuchungen im sichtbaren Spektralbereich eine kostengünstige kaltweiße LED oder auch eine Taschenlampe. Bei der Wahl der LED-Lichtquelle sollte darauf geachtet werden, dass diese eine möglichst große Lichtleistung bei gleichzeitig kleinem Abstrahlwinkel aufweist. Ziel ist es, dass eine möglichst hohe Lichtintensität durch die Probe transmittiert wird und auf den dahinter befindlichen Spalt fällt. Dies ist vor allem für die Untersuchung von Substanzen mit hohen Konzentrationen bzw. mit großen Absorptionen notwendig. In Abb. 2 ist der allgemeine Versuchsaufbau für die Messung von Transmissions- bzw. Absorptionsmessungen am Beispiel von Kaliumpermanganat (KMnO₄) dargestellt. Als Lichtquelle wird eine kaltweiße LED (40000 mcd, 8°) verwendet. Sowohl die Küvette als auch die LED werden mithilfe von LEGO®-Bausteinen auf der Grundplatte befestigt. Die detektierten Spektren lassen sich mithilfe eines Computers auslesen und damit als Absorptionsspektren aufbereiten. Dies ist bspw. im Kontext einer Konzentrationsbestimmung mithilfe des Lambert-Beer'schen Gesetzes erforderlich und erfordert die folgenden experimentellen Schritte:

1. Aufnahme des Referenzspektrums $I_0(\lambda)$, d.h. von einer Küvette, die mit dem verwendeten Lösungsmittel gefüllt ist

2. Aufnahme des Spektrums der Probelösungen $I_n(\lambda)$
3. Optional: Berechnung & Darstellung des Transmissionspektrums $T_n(\lambda)$ der Probelösungen mithilfe der Formel $T_n(\lambda) = I_n(\lambda)/I_0(\lambda)$
4. Berechnung und Darstellung der Absorptionsspektren $E_n(\lambda)$ mithilfe des Lambert-Beer'schen Gesetzes $E_n(\lambda) = -\log(T_n(\lambda)) = \epsilon \cdot c \cdot d$ mit ϵ als Absorptionskoeffizient, c als Konzentration der Probelösung und d als Schichtdicke
5. Bestimmung der Konzentration der unbekanntenen Lösung mithilfe des Lambert-Beer'schen Gesetzes

Durch den Austausch der Lichtquelle gegen eine UV-LED mit einer zum Spalt senkrechten Platzierung lässt sich der Aufbau der innerhalb von Sekunden für Lumineszenzmessungen anpassen.

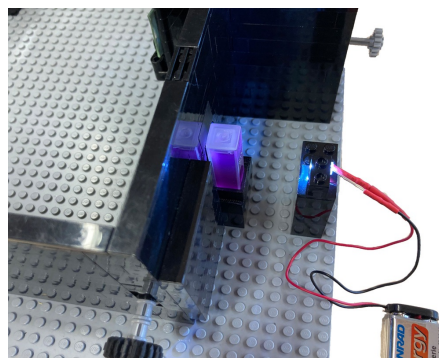


Abb. 2: Experimenteller Aufbau für die Aufnahme von Transmissionspektren mithilfe des LEGO®-Spektrometers am Beispiel von KMnO₄.

3.2 Reflexionsspektren verschieden gefärbter Festkörper

Die Untersuchung von Farbstoffen in Festkörpern stellt im Unterricht eine besondere Herausforderung dar, da die meisten Festkörper im Gegensatz zu gefärbten Lösungen keinerlei Transparenz aufweisen. Für eine spektroskopische Erfassung der Farbstoffeigenschaften der Probe ist stattdessen die Reflexionspektroskopie erforderlich. In kommerziell erhältlichen Spektrometern wird der Umbau zwischen Transmissions- und Reflexionsmessung häufig dadurch erreicht, dass Licht über einen Lichtwellenleiter (Glasfaser) in das Spektrometer eingekoppelt wird. Die modulare Bauweise des Spektrometers aus LEGO®-Bausteinen ermöglicht einen entsprechenden Umbau mit Faserkopplung innerhalb weniger Schritte. Um Licht in das Spektrometer einzukoppeln, lässt sich jede herkömmliche Glasfaser mit einem SMA-Stecker über einen LEGO®-Pin 1/2 (4274) direkt in das Spektrometer einkoppeln. Alternativ zu professionellen Glasfasern, welche ab ca. 80 € bis 100 € erhältlich sind, können auch vergleichsweise kostengünstige, optische Audiokabel (ab 3 €) verwendet werden. Das optische Audiokabel wird mithilfe von Sekundenkleber in den Adapterstein (4274) geklebt und lässt sich anschließend problemlos verwenden.

Um den Farbstoff des Festkörpers zu untersuchen, wird dieser von einer kaltweißen LED (40000 mcd, 8°) in einem 45° Winkel beleuchtet (vgl. Abb. 2). Das reflektierte Licht kann dann mithilfe der Glasfaser unter einem Winkel von 45° erfasst werden (Abb. 3). Bei der Reflexionspektroskopie muss ebenfalls ein Referenzspektrum aufgenommen werden. In diesem Fall wird i. d. R. ein weißer Festkörper aus gleichem

Material verwendet, bspw. ein weißer LEGO®-Baustein, wenn Farbstoffe in den Bausteinen unterschiedlicher Farben vermessen werden sollen.

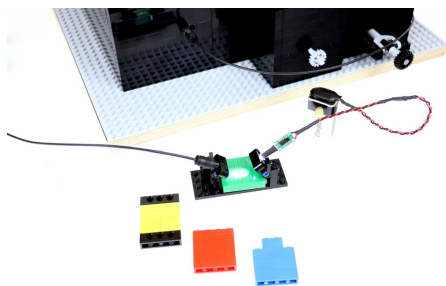


Abb. 3: Experimenteller Aufbau für die Aufnahme von Reflexionsspektren mithilfe des LEGO®-Spektrometers am Beispiel von herkömmlichen LEGO®-Bausteinen.

Die experimentellen Schritte für die Bestimmung eines Reflexionsspektrums ergeben sich entsprechend:

1. Aufnahme eines Referenzspektrum $I_0(\lambda)$ mit einem Referenzfestkörper: Hierbei sollte das Material verwendet werden, das auch bei den Farbproben zum Einsatz kommt.
2. Aufnahme des reflektierten Spektrums des gefärbten Festkörpers $I(\lambda)$
3. Berechnung und Darstellung des Reflexionsspektrums $R = I(\lambda)/I_0(\lambda)$

3.3 Schnelle Analyse und Visualisierung der aufgenommenen Messdaten

Neben der zuvor beschriebenen Aufnahme der Spektren ist die Auswertung bzw. Analyse der Messdaten ein fester Bestandteil spektroskopischer Untersuchungen. Abhängig vom verwendeten Spektrometer kann der hierfür erforderliche Aufwand für eine zielführende Auswertung stark variieren. Die Auswertung der Daten, die mithilfe kommerziell erhältlicher Spektrometer gewonnen werden, gestaltet sich i. d. R. problemlos und lässt sich im Unterricht schnell durchführen. Grund hierfür ist vor allem die zugehörige, anwenderfreundliche Spektrometer-Software, die nach wenigen Arbeitsschritten jegliche Auswertung für den Benutzer (semi-)automatisch durchführt. Im Gegensatz hierzu verwenden Schulen oder Fachgruppen bei DIY-Spektrometern meist Tabellenkalkulationsprogramme, wie z. B. Microsoft Excel oder Open Office. Auch wenn diese Art der Messdatenauswertung einen ungemessenen didaktischen Mehrwert liefern kann, so ist sie aus Zeitgründen, aber auch aus inhaltlichen Gründen, im Unterricht nicht immer sinnvoll bzw. realisierbar.

Für erste Auswertung der Messdaten des Spektrometers aus LEGO®-Bausteinen wurde von uns daher die anwenderfreundliche Webapplikation „spekAnalyzer“ gezielt entwickelt. Hierbei handelt es sich um eine lizenzkostenfrei verfügbare, Python-basierte Webapplikation, die durch einen lokalen Server auch ohne Internetzugriff jederzeit verwendet werden kann [9]. Der „spekAnalyzer“ soll vor allem als erste Schnittstelle zwischen dem Spektrometer und der ausführlichen Auswertung der Messdaten mithilfe eines Tabellenkalkulationsprogramms dienen, um eine erste schnelle Auswertung dieser Daten direkt nach dem Experiment zu ermöglichen. Eine Installationsanleitung sowie Tipps für den Gebrauch des „spekAnalyzer“ sind im zugehörigen GitHub-Verzeichnis zu finden [9]. Nachdem der „spekAnalyzer“ im Browser gestar-

tet ist, wird die in Abb. 4 dargestellte Benutzeroberfläche (zunächst ohne Spektren) angezeigt.

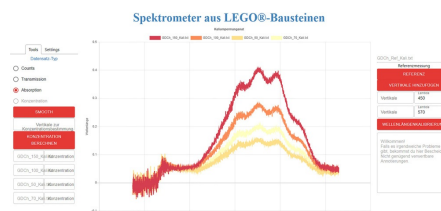


Abb. 4: Benutzeroberfläche des „spekAnalyzers“ mit den Absorptionsspektren der KMnO_4 -Beispieldaten.

Um die Funktionen der Software zu erproben, wird beim Herunterladen automatisch ein zusätzlicher Ordner („testData“) mit Testdaten/-spektren lokal gespeichert. Bei den Daten handelt es sich um die Messdaten des in Kapitel 3.1 beschriebenen Experiments zur Ermittlung von Transmissions- bzw. Absorptionsspektren am Beispiel von KMnO_4 . In dem Datensatz enthalten ist neben den KMnO_4 -Spektren mit unterschiedlichen Lösungskonzentrationen zusätzlich noch eine Referenzmessung, sodass sowohl Transmissions- als auch Absorptionsspektren bestimmt werden können. Sowohl die Testdaten als auch selbst aufgenommene Datensätze können auf einfache Weise durch „Drag and Drop“ in den „spekAnalyzer“ geladen werden. Anhand der in Abb. 5 dargestellten Messdaten des Experiments aus Kapitel 3.1 lässt sich gut erkennen, dass die mit dem in diesem Artikel vorgestellten Spektrometer gewonnenen Absorptionsspektren von KMnO_4 alle typischen, in der Literatur beschriebenen Charakteristika [12] im Wellenlängenbereich von 400–600 nm präzise darstellt.

Neben der ersten Auswertung von Transmissionspektren ist auch die Darstellung und erste Auswertung von Reflexionsspektren, die mithilfe des Spektrometers aus LEGO®-Bausteinen aufgenommen wurden, problemlos innerhalb von Sekunden möglich. In Abb. 5 sind die Messdaten des in Kapitel 3.2 beschriebenen Experiments zu sehen. Anhand der Reflexionsspektren lässt sich eindeutig erkennen, dass die jeweiligen LEGO®-Bausteine ihrer Farbe entsprechend Licht der passen-

Spektrometer aus LEGO®-Bausteinen

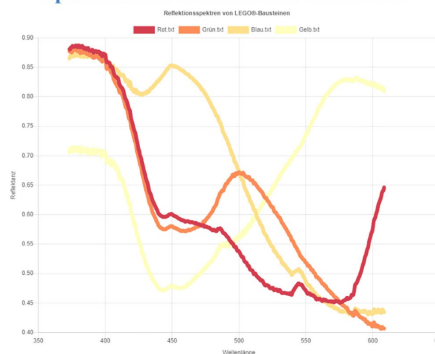


Abb. 5: Reflexionsspektren der verschiedenen LEGO®-Bausteine im „spekAnalyzer“.

TAGUNGSARTIKEL

Osterheider, Bourdon, Boettcher, Imlau, Beeken

den Wellenlängen besonders stark reflektieren. So weist z.B. der blaue Baustein ein lokales Reflexionsmaximum bei 450 nm auf, während der grüne Baustein sein lokales Reflexionsmaximum bei 500 nm aufweist. Besonders auffällig ist ein Peak bei ca. 440 nm in den Reflexionsspektren des roten und blauen Bausteins, der vermutlich von einer Farbstoffkomponente, die in beiden Bausteinen verwendet wird, herrührt. Im Chemieunterricht können Schüler:innen anhand von Reflexionsspektren nicht nur ein Verständnis dafür entwickeln, wie die Färbung des Bausteins zustande kommt, sondern auch Rückschlüsse auf eventuelle Gemeinsamkeiten in der chemischen Zusammensetzung der Farbstoffe ziehen.

4. Zusammenfassung

DIY-Spektrometer sind im modernen Chemieunterricht unerlässliche Lehrwerkzeuge und lassen sich vielfältig in den anwendungsrelevanten Bereichen, wie Umwelt und Klima, Kunststoffforschung und Lebenswissenschaften, aber auch im Kontext grundlagenwissenschaftlicher Lehrinhalte, wie das Verständnis des Lambert-Beerschen Gesetzes, einsetzen. Aus übergeordneter Sicht ist das experimentelle Arbeiten mit Spektrometern für den Kompetenzerwerb zum „wissenschaftlichen Arbeiten“ einschließlich der Bewertung von Messdaten, der Fehleranalyse oder der Dokumentation essenziell. Während bislang DIY-Spektrometer vorrangig aus Kostengründen und für die Vermittlung spezifischer Lehrinhalte in der Literatur vorgestellt wurden, zielt das Spektrometer aus LEGO®-Bausteinen dieses Artikels auf eine weit breitere Anwendung. Konkret lassen sich mit ein und demselben Messsystem durch einfache Umbauten Transmissions-, Reflexions- und Lumineszenzmessungen realisieren. Das Anwendungsspektrum umfasst damit u.a. die Photosynthese in den Lebenswissenschaften, die Hochpräzisionsanalytik in der Materialchemie, die Bestimmung von Reaktionskinetiken in der Photochemie bis hin zur Bestimmung atomarer Übergänge in Lumineszenzdioden. Auch können potenziell aktuelle Themen aus der Coronaforschung, wie bspw. die Ausbreitungsdynamik von Aerosolen durch Streulichtverlustmessungen, adressiert werden. Der Kern des Lösungsansatzes basiert auf einer stark modularisierten Konstruktionsweise eines Czerny-Turner-Designs, die aus einer Kombination von LEGO®-Bausteinen für die mechanischen Komponenten und preiswerten, aber hochwertigen Optiken und Detektoren resultiert werden konnte. Im Ergebnis gelingt es bei einem Kostenansatz von ca. 500 € ein Messsystem zu realisieren, das ein spektrales Auflösungsvermögen kommerzieller Laborgeräte aufweist. Aus Sicht der Lehr- und Lernforschung zählen zu den besonders vorteilhaften Aspekten u.a. das Aufbrechen von „Blackbox“-Systemen, sodass auch ein Verständnis über die Messtechnik selbst vermittelt werden kann, aber auch die Kombination des Experimentiersystems mit einer maßgeschneiderten Open-Source-Webapplikation, die eine schnelle Visualisierung der Messdaten, aber auch die Kalibration des

Spektrometers und die gezielte Auswertung ermöglicht. Weitere Aspekte sind die – der Unterrichtsstunde – angepasste Umbauzeit oder die Möglichkeit, Schüler:innen in den Aufbau des Spektrometers durch Verwendung eigener LEGO®-Bausteine zu integrieren. Besonders vielversprechend ist der Aspekt der spiralcurriculären Verwendung über verschiedene Unterrichtseinheiten, aber auch fächerübergreifend hinweg, bis hin zur semi-professionellen Anwendung im Rahmen von Schul-Arbeitsgemeinschaften.

Danksagung

Open Access Veröffentlichung ermöglicht und organisiert durch Projekt DEAL.

Literatur

- [1] Hessisches Kultusministerium (2021). Kerncurriculum gymnasiale Oberstufe Bildungsland Hessen – Chemie. <https://kultusministerium.hessen.de/sites/kultusministerium.hessen.de/files/2021-07/kego-ch.pdf> (letzter Zugriff 23.03.2022).
- [2] PHYWE (2021). Spektrometer Pro LED. https://www.phywe.de/geraete-zubehoer/optische-komponenten-systeme/spektrometer-pro-led_3142_4073/ (letzter Zugriff 10.12.2021).
- [3] LEYBOLD® (2021). Kompakt-Spektrometer. Physik. <https://www.leybold-shop.de/chemie/geraete/chemie-demonstrationsversuche/anorganische-chemie/stoffeigenschaften/467251.html> (letzter Zugriff 10.12.2021).
- [4] Bougot-Robin, K., Paget, J., Atkins, S. C., Edel, J. B. (2016). Optimization and design of an absorbance spectrometer controlled using a raspberry pi to improve analytical skills. *J. Chem. Educ.* 93/7, 1232–1240.
- [5] Grasse, E. K., Torcasio, M. H., Smith, A. W. (2015). Teaching UV-vis spectroscopy with a 3dprintable smartphone spectrophotometer. *J. Chem. Educ.* 93/1, 146–151.
- [6] Hosker, B. S. (2017). Demonstrating principles of spectrophotometry by constructing a simple, low-cost, functional spectrophotometer utilizing the light sensor on a smartphone. *J. Chem. Educ.* 95/1, 178–181.
- [7] Witte, T., Hanemann, S., Sommerfeld, H., Temmen, K., Fechner, S. (2019). Selbstbau eines digitalen Low-Cost-Fotometers für den Chemieunterricht. *CHEMKON* 27/4, 193–198.
- [8] Czerny, M., Turner, A. F. (1930) Über den Astigmatismus bei Spiegelspektrometern. *Zeitschrift für Physik* 61/11–12, 792–797.
- [9] Imlau Research Group (2021). myphotonics. <http://www.myphotonics.eu/> (letzter Zugriff 02.12.2021).
- [10] Osterheider, M., Boettcher, R., Bourdon, B., Imlau, M. (2021). 1000 Laser-Hacks für MAKER Atomspektren selber messen. Bombini Verlag, Bonn.
- [11] Schüler, L. (2021). spekAnalyzer. <https://github.com/lukasschueler/spekAnalyzer> (letzter Zugriff 02.12.2021).
- [12] Boef, G. D., van der Beek, H. J., Braaf, T. (2010). Absorption spectra in the visible and U. V. region of potassium permanganate and potassium manganate in solution and their application to the analysis of mixtures of these compounds. *Recueil des Travaux Chimiques des Pays-Bas* 77, 1064–1070.

Eingegangen am 21. Dezember 2021

Angenommen am 22. März 2022

3. High-end DIY spectroscopy for Makers

With the help of the innovative format presented in this chapter, the accessibility of DIY high-end spectroscopy to the group of Makers and tinkerers shall be opened. The origins of this format lay in the myphotronics project [26], which in turn has made interferometry and holography accessible to the same group through books [27, 28]. This is also where this format comes in, with a New Volume, "Measuring atomic spectra yourself" (translated from German original title "Atomspektren selber messen") [29] in the book series. The cover of the book can be seen in Fig. 3.1.



Figure 3.1.: Cover of the "Measuring atomic spectra yourself" volume.

In the following sections, the Maker movement will be briefly introduced, the concept under-

lying the book will be described, and the spectroscopy-specific volume will be presented.

3.1. Maker Movement

The Maker movement originated in the DIY scene [30] and can be traced back to the publication of Dale Dougherty's *make* magazine by O'Reilly Publishers in 2005 [31]. Due to the creation of a common platform and the generally high level of interest, the first trade fair for makers, a so-called *Maker Faire*, was organized in 2006 [32]. Since then, the number of Makers and Maker-specific events has continued to rise [30].

In general, Makers from a wide variety of countries have one basic idea in common: solving (everyday) problems as creatively as possible or adding new functions to a product, known as hacking [30, 31, 33]. To implement these hacks, the Makers use inexpensive and widely available tools, and components such as single-board computers (e.g., Arduino or RaspberryPi), 3D printers, laser cutters, and building kits like LEGO[®] or fischertechnik[®] [30]. In addition, more specific individual components like lasers, mirrors, or specific detectors are used, which are suitable for integration into the project/product [30, 31].

The motivation of the Makers to design or modify products is not primarily financial success, e.g., through the sale of a possible product or the founding of a company. Instead, the focus is on the fun of tinkering, developing, and the joy of using and presenting the product/project they have designed themselves [30, 31]. For this reason, it is also common in the Maker movement to publish all instructions, construction plans, and even entire projects under an open-source concept [30, 34].

Due to the excellent networking of the Makers via the Internet, the community is constantly growing. Makers from a wide variety of fields are meeting more and more frequently to collaborate [30]. In order to offer this process a different platform, extra *Maker Spaces*, *FabLabs* and *student labs* are being founded and launched in many cities, which are often equipped with various Maker tools in addition to the one common location [30]. Besides, special events such as *Hackathons* or *Makeathons* are organized here, in which the Makers have to solve or work on a certain (often unsolved) problem within a specified time frame [35].

Next to the intensive involvement with the development of products, another part of the Maker movement is education and research [30]. Examples of the focus of a Maker project on research are the *sensBox* project [36], which enables interested Makers to make a scientific contribution to weather measurement with the citizen science-based *openSenseMap* [30, 37, 38].

Within this framework, the format presented in this chapter should also enable the *Makers* to produce a high-end spectrometer with the help of Maker tools so that the area of interest of the research by the Makers can also be extended to UV-VIS spectroscopy, for example, to cover astro-spectroscopy.

3.2. 1000 Laser-Hacks for Makers

The book series "1,000 Laser-Hacks for Makers" (translated from the German original title "1,000 Laser-Hacks für Maker") emerged from the myphotronics project. They aimed to provide users with the ability to perform optical experiments. Therefore, specially developed step-by-step instructions are provided and are backed up with the necessary background knowledge [26, 30]. The entire genesis of the book concept from a cross-target group concept to a cross-target

group book is detailed by *Klompmarker* in his work using the example of laser interferometry [39]. For this reason, only the book series' basic principles and special features will be briefly described here. A more detailed description of the unique features can be found in the works of *Klompmarker* [39] and *Lager* [30].

The books are always designed to describe a superordinate experiment (in this case, "Measuring atomic spectra yourself"). The target group for the books is usually Makers but also students, teachers, and researchers. In order to make the books of the series appealing to all possible target groups, the respective physical backgrounds, which are necessary for understanding the superordinate experiment, are explained in the book itself. In addition, information about other literature is provided at the appropriate points so that the subject can be optionally studied in detail and a self-differentiating teaching aid is created [30, 39, 40]. The experiments discussed are always placed in an application context, so their relevance for the book users is clear. The materials for implementing the experiments are chosen so they can be obtained as efficiently as possible and are "in line" with the tools used by the Maker movement. In the case of more specialized components such as mirrors, light sources, and detectors, care is taken to ensure that they provide the best price/performance ratio. In the open-source concept underlying the Maker movement, all parts lists and sources of components are published, and freely accessible [26, 41, 42].

The structure of the books is divided into primary and secondary experiments, as well as further so-called "next-level hacks". In each case, the focus is on an experiment, with the help of which the necessary technical knowledge is conveyed. The structure of the individual components and the associated experiments is divided into individual self-contained steps, the so-called "laser hacks". The range of laser hacks extends from assembling mechanical components to complicated experiments. In contrast to the laser hacks of the primary and secondary experiments, the next-level hacks are experiment ideas for particularly interested and motivated users. Whereas a central component of the laser hacks is the transfer of knowledge, the focus of the next-level hacks is on research [30, 39]. Within the laser hacks, there are info boxes in some places, which convey the necessary physical background knowledge. Moreover, there are small boxes in the margins of all the hacks with further information or references to literature.

In addition to the books in the series, a companion website is available to users [43]. Besides explanatory videos on the construction of the components and the performance of some experiments, the website also contains bundled, detailed construction lists and technical literature. In addition, educational materials such as worksheets and interactive GeoGebra files can be found in the website's download area.

3.3. Volume: Measuring atomic spectra yourself

After the first two books, "Interferometer to build yourself" (translated from German original title "Interferometer zum Selberbauen") [27] and "Do it yourself Holograms" (translated from German original title "Hologramme zum Selbermachen") [28] in the "1,000 Laser Hacks for Makers" book series, the volume "Measuring atomic spectra yourself" [29] was created. In the following, the structure and content of the book are presented first, then the special features of the book compared to the previously published volumes will be explained. It should be noted that the basic design concept of the book series is already described in the work of *Klompmarker* [39]. Iterative optimizations of the book series are described in the work of *Lager* [30], which is

why this will not be discussed later.

The structure of the volume, like the other books in the series, can be divided into three sections: 1) the Czerny-Turner spectrometer, 2) the recording of atomic spectra, and 3) the next-level spectrometers.

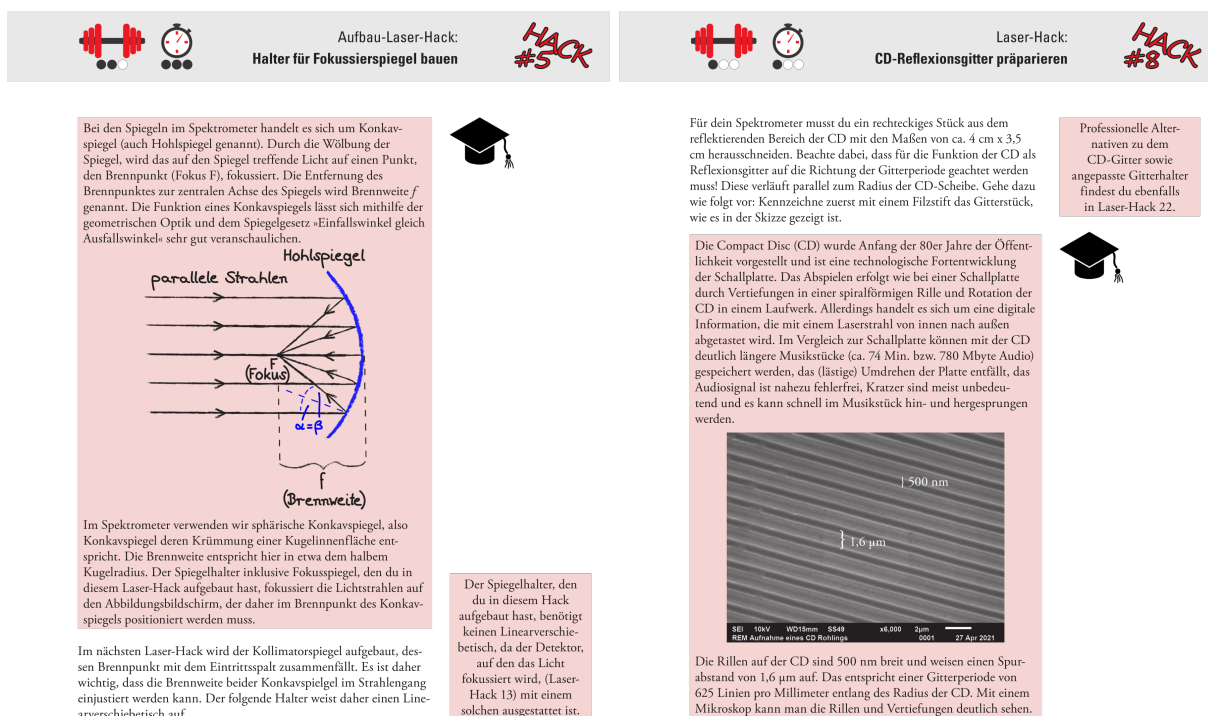


Figure 3.2.: Pages 55 and 95 from the book. Left: Page 55 with an explanation of how a concave mirror works; Right: Page 95 with an explanation of how a Compact Disc (CD) works.

The book's first section explains the basic construction and operation of a Czerny-Turner spectrograph. In addition to the mechanical structure of the individual components, the operation of the optical components (mirrors and gratings) is explained with the help of info boxes. Fig. 3.2 shows excerpts from the book explaining the mirrors and gratings. It should be noted that a conventional CD is used as the refractive grid in the book. After the individual components and their structure have been described and explained, the structure and adjustment of the spectrometer are demonstrated at the end of the book's first part. Fig. 3.3 shows individual pages for adjusting the spectrometer.

The book's second part focuses on the eponymous experiment of its title: the measurement of atomic spectra. For this purpose, the observation screen of the spectrometer is first exchanged against an adjustable USB line scan camera (based on a charge-coupled device (CCD)). Both the essential operation and the control of the CCD are subsequently explained in the book. For this purpose, the control software of the CCD is shown, and its setting parameters, such as integration time and frame time, are explained.

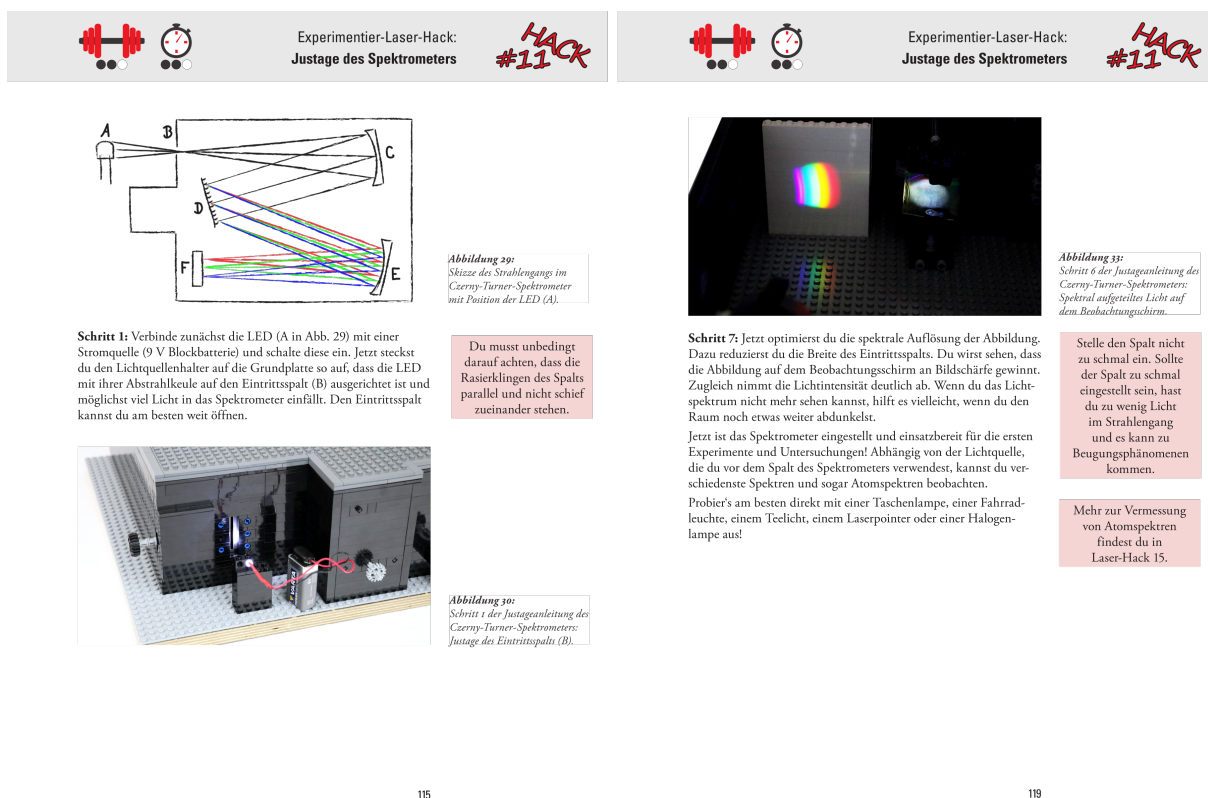


Figure 3.3.: Left: Page 115 with a schematic sketch of the beam path in the spectrometer; Right: Page 119 with the spectrum of a light source on the observation screen of the adjusted spectrograph.

At the end of the chapter, the fundamental physics of atomic spectroscopy is described before recording an atomic spectrum using an energy-saving lamp and performing a wavelength calibration.

In the third and final part of the book, the reader is presented with multiple suggestions as to what types of investigations can be performed using the spectrometer and what modifications of the spectrometer are possible to further improve its usability in various fields of application. The topics covered range from resolution enhancement, fluorescence, and reflectance spectroscopy to astro spectroscopy.

Compared to the two previous books in the series, this book is structurally very different. While the titles of the other books always name the result of its first part and then build on this in the following parts, the eponymous theme of this book is only covered after the second. The main reason for this is the complexity of the subject and the size of the structure associated with it. For the spectrometer to be used for recording atomic spectra, it must be precisely adjusted. In order that a reader without previous knowledge does not fail at the end of the book's first part because of a possibly too complicated classification, only the spectral division of light into its components is discussed in this part. Here, the accuracy of the adjustment is not as decisive, so the book's first part can be successfully completed as quickly as possible. Only in the second part of the book are the adjustment and electronic detection of the spectrum

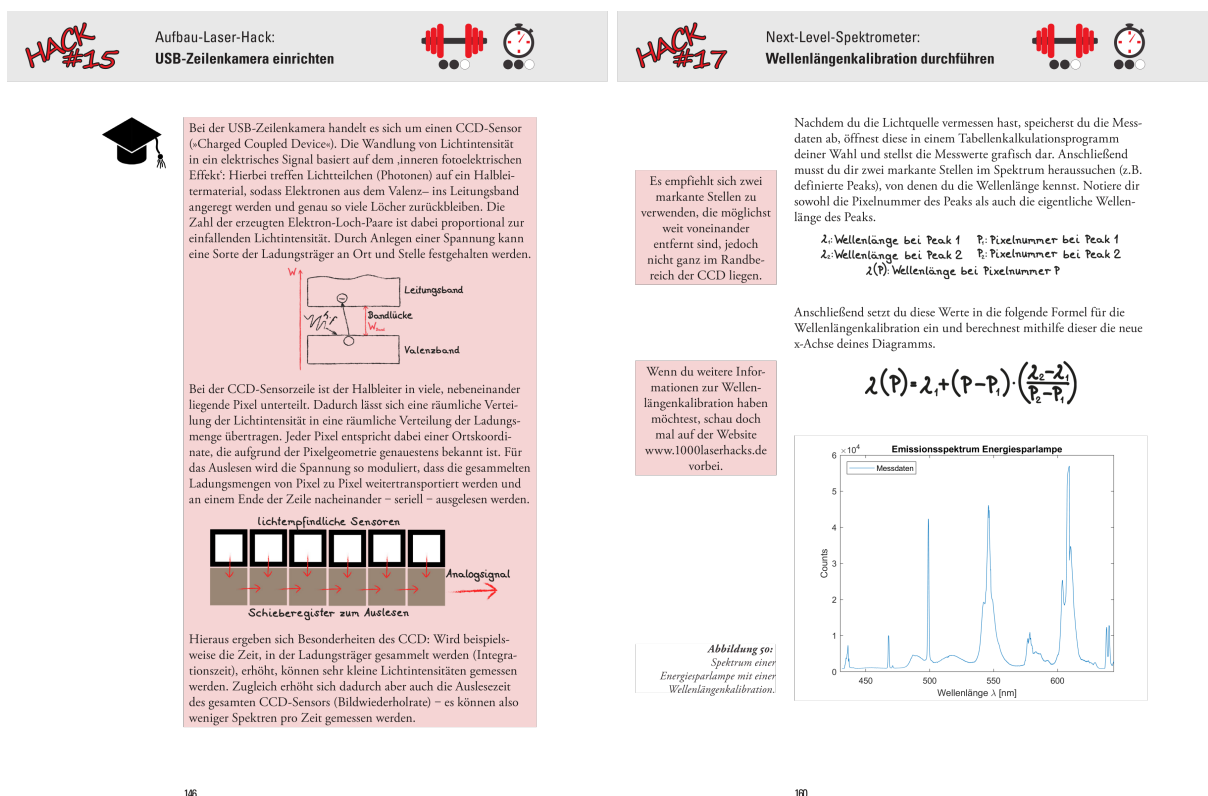


Figure 3.4.: Left: Page 115 with an explanation on the working principle of a CCD ; Right: Page 119 with an explanation on how to do a wavelength calibrated of a registered spectrum.

and the subsequent recording of an atomic spectrum dealt with, so that motivated readers can master the challenge of atomic spectroscopy with the knowledge accumulated at this point and the sense of achievement in part one.

The third part is based on the third part of the book "Do it yourself Holograms" in the sense that both, unlike the first in the series, also contain explanations in the third part, which make the further experiments more understandable. It is important to note that, of course, only some experiments in the book's third part are provided with further explanations; instead, these are limited to topics that can be understood with the basic knowledge created beforehand.

In contrast to the first two books in the series, this book's subject is relevant not only in the context of physics but much more in the natural sciences, where UV-VIS spectrometers are used in all fields. Thus, the target group of the book is even more heterogeneous, not only in terms of knowledge and age but also in terms of application, than is the case with the previous volumes. The book can be of practical use in research and development for makers with a wide variety of backgrounds, be it physics, chemistry, biology, electrical engineering, Etc.

In summary, the entire format "1,000 Laser Hacks for Makers" and especially the volume "Measuring atomic spectra yourself" is highly suitable to not only present the topic of high-end spectroscopy to the Maker movement but also to enable them to independently perform precision spectroscopy at home, in the *FabLabs*, Etc. the detailed explanations and the staggering difficulty

levels enable even inexperienced makers to get started with the topic without the need for special in-depth knowledge of spectroscopy or physics.

4. High-end DIY spectroscopy at home

Due to the outbreak of the COVID-19 pandemic in Germany at the beginning of 2020 [24], regular teaching in both universities and schools was converted to online teaching. While classical teaching, such as a lecture, could continue to take place relatively easily in this format, implementing experimental practical training, which requires precise measurement systems, such as a spectrometer, has become almost impossible. It is precisely this problem that the online practical training format described below addresses.

Two formats have been designed to work out the mode of operation and various fields of application of high-end UV-VIS spectroscopy using a Czerny-Turner spectrometer in the context of a practical training at home. In addition to the possibility of carrying out the practical training at home, the participants are required to set up the necessary spectrometer and determine specific system variables on their own. The associated tasks and experiments are open-ended, allowing the most creative and free problem-solving possible.

4.1. Online practical training first round

In the first iteration of the online practical training, following the example of the myphotronics project [27, 28, 44], conventional LEGO[®]-bricks were used for the basic construction of the spectrometer.

4.1.1. Course of the practical training

All necessary materials were sent to the students via mail. The practical training took place over two weeks. Within the practical training, the students had multiple short lectures (approx. 15 min) with all necessary background information to work on the given tasks. In the beginning of each lecture, students had the opportunity to ask questions regarding the already given tasks. The tasks were designed so that the students had complete freedom in finding and implementing solutions to empathize further research by the students. The students documented their results in a report. Table 4.2 shows the schedule of the practical training and the tasks of the respective work phases.

Table 4.1.: Schedule and tasks during the practical training.

Date	Content
29.06.	Lecture 1: - (repairs of broken components) - general information

29.06. - 01.07.	Work phase 1: - construction of the spectrometer components - determination of the angle of rotation of the mirror holder - adjustment of the entrance slit - evaluation of problems that can occur with a too narrow slit
01.07.	Lecture 2: - answering any questions you may have about the previous tasks - introduction to error calculation
01.07. - 03.07.	Work phase 2: - characterization of the grating - explanation of the principle of operation of the spectrometer - theoretical discussion of a blaze grating
03.07.	Lecture 3: - answering any questions you may have about the previous tasks - adjustment of the spectrometer
03.07. - 06.07.	Work phase 3: - construction of the spectrometer - adjustment of the spectrometer with a continuous light source - control of the CCD software - wavelength calibration of the spectrometer
06.07.	Lecture 4: - answering any questions you may have about the previous tasks - spectral resolution - angular dispersion - linear dispersion
06.07. - 08.07.	Work phase 4: - determination of the spectral resolution of the spectrometer - calculation of the angular dispersion - calculation of the linear dispersion - determination of the linear dispersion of the spectrometer
08.07.	Lecture 5: - answering any questions you may have about the previous tasks
08.07. - 10.07.	Work phase 5: - determination of the time dependency of the spectra of different LEDs
10.07.	Lecture 6: - answering any questions you may have about the previous tasks - introduction to the "mol" concept - Lambert-beer law
10.07. - 13.07.	Work phase 6: - determination of the transmission- and absorption spectrum of methyl orange - determination of the concentration of a sample (metyl orange) with an unknown concentration
13.07.	Lecture 7: - answering any questions you may have about the previous tasks

17.07.	Return of the materials to the university
31.07.	Submission of reports

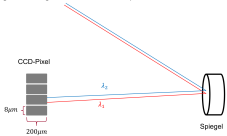


Figure 4.1.: Photo of the prepared materials for postal dispatch for each participant of the practical training.

Figure 4.2 shows some slides from the introductory lectures. It should be noted that the presentations were originally presented in German and have been translated into English for ease of reading in this thesis.

Linear dispersion

- The linear dispersion $\frac{\Delta\lambda}{\Delta\lambda}$ describes the spatial distance between two wavelengths λ_1 and $\lambda_2 = \lambda_1 + \Delta\lambda$ in the observation plane
- For the spectrometer, the observation plane is the CCD
- Too small spatial distances lead to multiple wavelengths falling on one detection pixel
- One pixel detects multiple wavelengths
- The larger $\frac{\Delta\lambda}{\Delta\lambda}$ the poorer the spectral resolution.

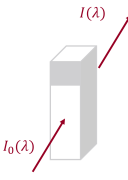


The Bouguer-Lambert-Beer's Law

- By Bouguer-Lambert-Beer's law the extinction (in physics absorption) of a medium can be calculated approximately as follows:

$$E_{\lambda} = -\log_{10} \left(\frac{I(\lambda)}{I_{0,korr}(\lambda)} \right) = \epsilon_{\lambda} \cdot c \cdot d$$

- c as concentration in $\frac{\text{mol}}{\text{L}}$
- ϵ_{λ} as extinction coefficients of the individual wavelengths
- d as the thickness of the medium
- This is an approximate formula, but it is sufficient for most concentration determinations



Tasks for the sixth practical phase

- Determine the transmission spectra T_{korr} and graph them.
- Determine the absorption spectra E_{λ} of the methyl orange solutions and represent them graphically.
- Determine the concentration of the 4th solution using Bouguer-Lambert-Beer's law. Use at least 3 different wavelengths for this.
- Present the data in a diagram
 - Fit the data with an appropriate regression
 - Why can the measurement results of different wavelengths be used to calculate an average value?
 - Perform a quantitative error analysis

Tasks for the fourth practical phase

- Determine the spectral resolving power $\frac{\Delta\lambda}{\Delta\lambda_{FWHM}}$ of the spectrometer with at least two different light sources.
- Calculate the angular dispersion $\frac{d\theta}{d\lambda}$ of the spectrometer.
 - What is angular dispersion?
 - How to calculate the angular dispersion (derivation)?
 - What is the angular dispersion of two different wavelengths?
 - Quantitative error analysis

Figure 4.2.: Some slides from the introductory lectures of the first round of the online practical training. Translated from German.

4.1.2. Used experimental setup

Apart from the breadboard, all the components needed to build the C-T spectrometer were shipped in individual parts, so the participants had to assemble all the components of the spectrometer (optics mounts, side panels & lid) on their own. After assembling the components, the breadboard can be used to perform all the experiments in online practical training on it (see Table 4.2). Figure 4.3 shows a photo of one of the realized C-T spectrometers (without lid, so that the internal structure can be seen).

Detailed assembly instructions were available for setting up the individual components of the spectrometer. Figure 4.4 shows some excerpts from these as examples.

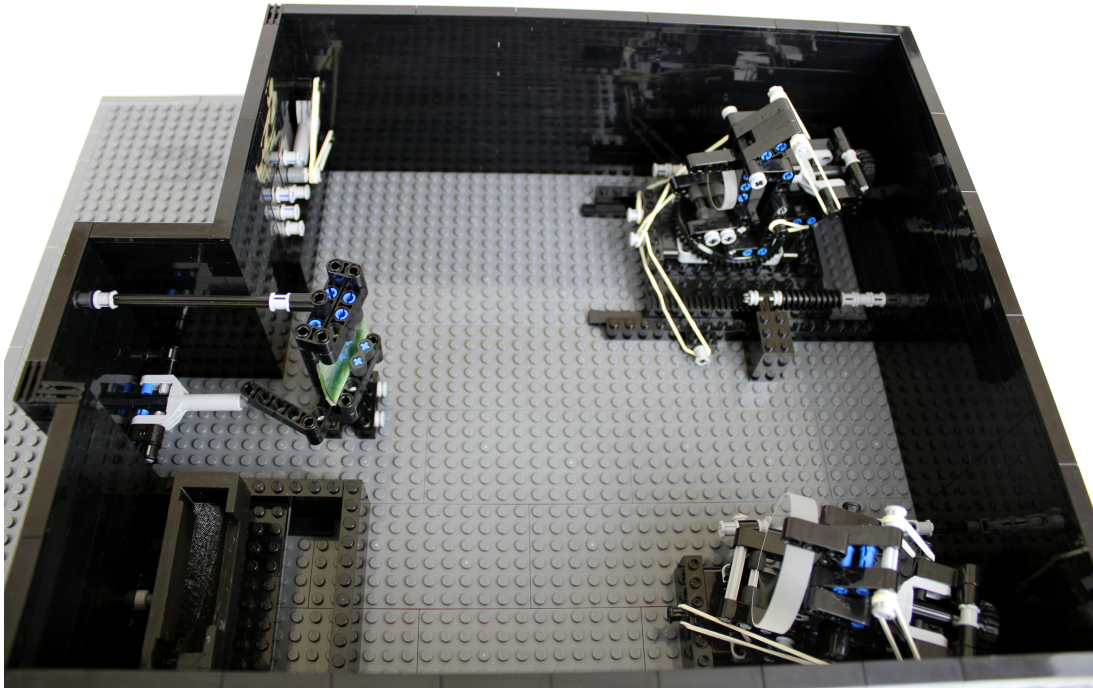


Figure 4.3.: Photo of the C-T spectrometer build with LEGO[®]-bricks used by the participants in the practical training.

4.2. Online practical training second round

For the second iteration of the online practical training, instead of using LEGO[®]-bricks to construct the C-T spectrometer, the Optocubes framework [45] was used in order to drastically reduce the time associated with the construction. This time reduction also has the effect that the time available in the practical training can be spent less on building a basic mechanical construction and more on working out the tasks. In addition, the optomechanical holders used in the Optocubes framework offer improved stability and precision, which facilitates handling the entire experimental setup.

4.2.1. Course of the practical training

The practical training was carried out at home, with all materials necessary for the practical training being sent by mail before the start (see Fig. 4.5).

The superordinate content of the practical training was the same for all participants, regardless of age and location. Adjustments were made on the one hand regarding the depth in which the topics were covered and on the other hand in the amount of assistance provided. These adjustments were made primarily to compensate for the pupils' lack of basic knowledge in mathematics and physics. The assistance provided here was targeted and adapted to the respective participants. In addition, the time scope was also adapted to the respective groups. The participants can be divided into two groups: Students and pupils. In the following, the

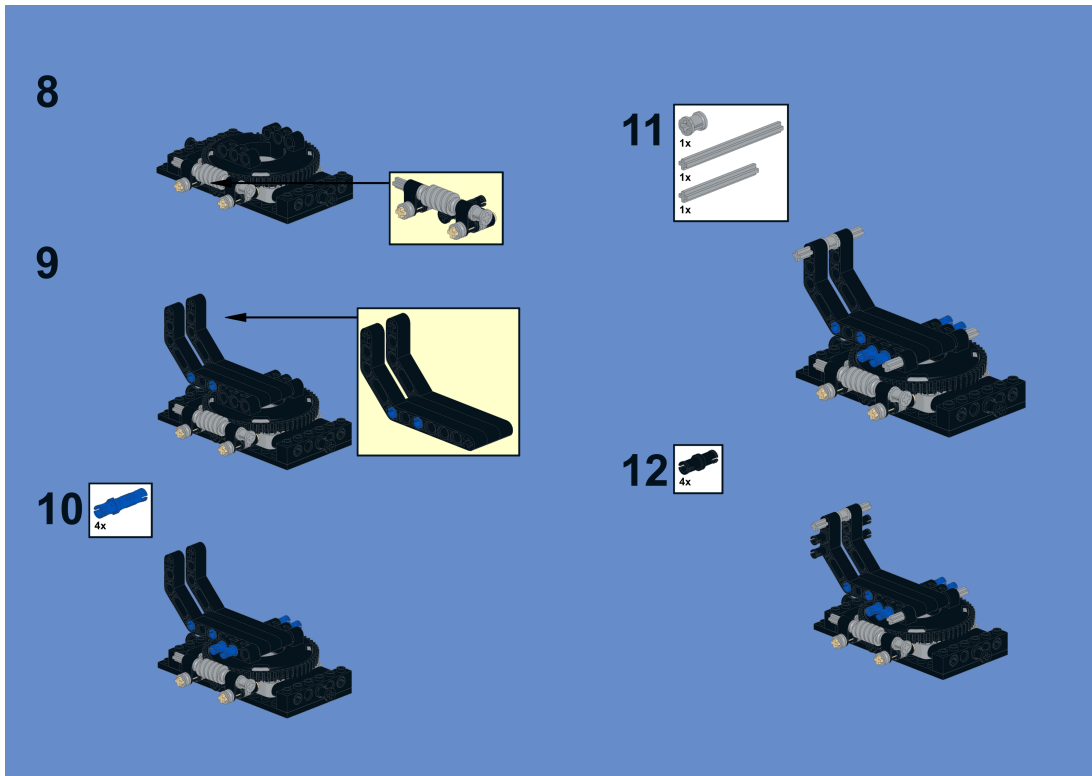


Figure 4.4.: Excerpt from the construction manuals that were available to the participants for the construction of the spectrometer



Figure 4.5.: Photo of the prepared materials for postal dispatch for seven participants of the practical training.

respective course of the practical training is described.

Students

The students’ practical training took place within 2 weeks. At the beginning of each week, the students received an introductory lecture of about one hour. After the introductory lecture, the students were given the tasks to be completed by the beginning of the next week. After each lecture, the students had the chance to ask questions about the respective tasks or contents of the lecture.

Pupils

The practical training with the pupils took place on four consecutive days for 4 hours each. In contrast to the students, the introductory lecture was not given at the beginning of the course, but was worked through with the students over the entire practical training period. After the system’s construction principle was explained, the students had the chance to work on the system directly afterwards and ask questions if there were any problems. The more direct supervision of the students ensured that the age difference of up to 10 years combined with any lack of specialized knowledge did not become an obstacle to carrying out the practical training.

In the following table, one can see the contents of the lectures and the corresponding tasks covered in the practical training.

Table 4.2.: Contents and tasks covered in the practical training. Differences in contents and tasks between students and pupils are marked accordingly.

Contents of the lecture	Tasks
Lecture 1: - Rough theory of electromagnetic waves ^a - Rough theory of UV-VIS spectroscopy - Working principle of the C-T spectrometer - Working principle of concave mirrors ^a - Working principle of diffraction gratings ^a - Construction instructions - Wavelength calibration of the spectrometer - Rough theory on atomic spectra ^a	Tasks 1: - Determining the focal length of the mirrors - Determination of the lattice constant - Construction of the Spectrometer - Wavelength calibration of the spectrometer - Determination of the FWHM of a monochromatic line ^b

<p>Lecture 2:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Angular dispersion - Linear dispersion - Transmission spectroscopy^a - Absorption spectroscopy - Lambert-Beer Law 	<p>Tasks 2:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Determination of the spectral resolution^b - Determination of the angular dispersion^b - Determination of the linear dispersion^b - Determination of transmission spectra of sample solutions - Determination of absorption spectra of sample solutions - Determination of the concentration of a sample of unknown concentration
---	--

^aTopic only covered with the pupils; ^bTopic only covered with the students

Figure 4.6 shows some presentation slides from the practical training lectures for both pupils (left) and students (right).

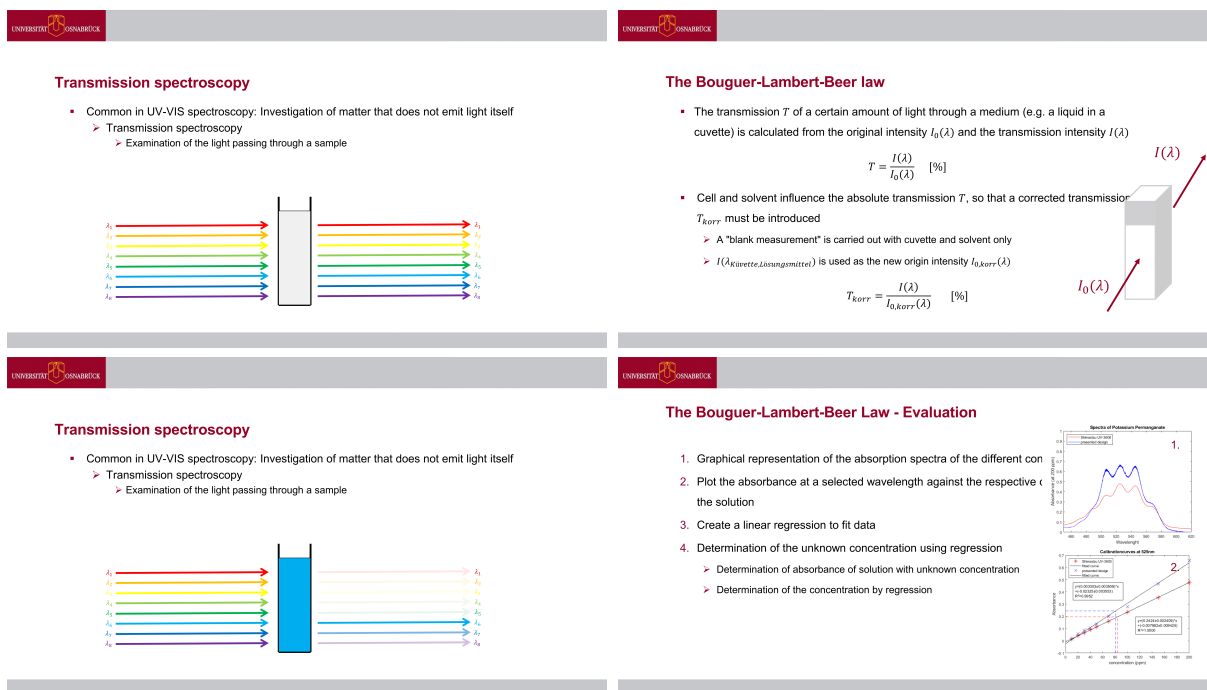


Figure 4.6.: Some slides from the introductory lectures of the second round of the online practical training. Left: slides designed for students; Right: slides designed for pupils. Translated from German.

4.2.2. Used experimental setup

All the necessary components for setting up a 3 x 3 breadboard [45] were available to the participants to carry out the practical training. Furthermore, all optical and mechanical components necessary to build a C-T spectrometer were provided (including a commercially available Compact Disc (CD) as an alternative to the blazed grating).

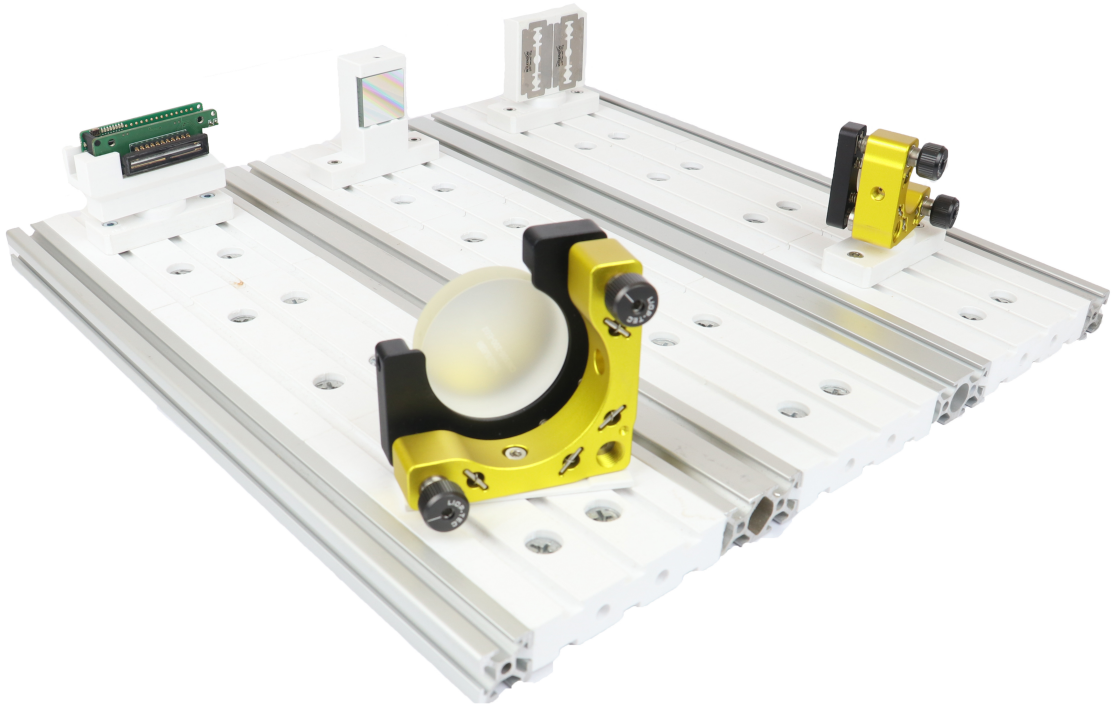


Figure 4.7.: Photo of the C-T spectrometer built using the Optocubes framework [45] and used by the participants of the practical training.

After assembling, the 3 x 3 breadboard is used as a baseplate for mounting all other components in order to realize the setups required for the required tasks (see Table 4.2). After the preliminary experiments, the setup of the C-T spectrometer is realized on the breadboard. Figure 4.7 shows a photo of the C-T spectrometer realized by the participants in the practical training.

In order to save time in setting up the system and to reduce the number of components to be shipped, it was decided not to use a fixed housing for the 3 x 3 breadboard in the practical training. Instead, stray light is prevented from entering the system by darkening it with a commercially available paper bag as a substitute for housing. In addition, all experiments in which the detector of the spectrometer is used are carried out in a darkened room.

5. High-end DIY spectroscopy at the University

The aim of university practical training in the field of physics is usually the clarification or investigation of known physical phenomena. This applies to both basic and advanced practical training [46–48]. For this purpose, dedicated experimental setups are available to the students, which may still need to be (partially) assembled by the students. Depending on the experiment, the measurement data is recorded using sensors and computer programs provided so that the data collected only have to be analyzed in the context of the experiment. The respective experiments usually follow a practical training script, which specifies not only the course of the experiment but also the subsequent evaluation of the collected data.

Although conventional practical training is capable of teaching physical phenomena and their background through experimentation, it is not capable, or only to a very limited extent, of promoting the acquisition of skills in the area of problem-oriented practical research [49]. The processing of research papers and related successes, e.g., in the context of a thesis, require associated skills such as planning, design, and execution of experiments, choice of measurement methodology, assessment and evaluation of measurement results, and their analysis and documentation, coupled with a sound knowledge of fundamental physics.

The *Applied Physics / Hands-on Physics* format developed and performed at the University of Osnabrück, which is presented in this chapter, is intended to address this issue. The aim here is to promote the acquisition of competencies by the students in the area of independence in experimental research. The format follows the approach of using a novel experimentation platform based on free hardware and tools of the Maker movement, which enables the students to realize complex measurement apparatuses and experiments independently. In addition, single-board computers such as Arduino or Raspberry Pi are used to control and coordinate any experimental processes. The fundamentals of the subject matter, as well as technical content, are discussed in an accompanying lecture, and the application of this knowledge is then taught in practical training.

The goal of the *Applied Physics / Hands-on Physics* format is to create the following competencies in the context of physics practical training beyond the mere teaching of subject content.

- (i) Ability to set up and plan experiments independently.
- (ii) Ability to work independently in developing approaches to solutions.
- (iii) Agility in experimentation.
- (iv) Knowledge of digitization in research and additive manufacturing tools.
- (v) Target-oriented scientific work.

In the following, the course of the entire practical training, including the respective contents, will be described before the contents of the lecture, and the setup used in the actual practical training will be described in more detail. It should be noted that the practical training and the lecture cover a variety of topics (listed in Table 5.1). However, in the context of this thesis, only those parts of the format that dealt thematically with spectroscopy will be discussed in more detail.

5.1. Course of the format Applied Physics / Hands-on Physics

Format *Applied Physics / Hands-on Physics* is basically divided into two parts, with each part conducted by a different research group. The first part of the format is primarily concerned with the electrical components of an experimental setup, the acquisition of measurement data, and the control of various sensors, while the second part of the practical training experimentally investigates the properties of coherence, power, and frequency of light.

The individual subject blocks of the parts are always divided into two lecture terms and two practical terms. The lectures were always completed before the practical training so that the necessary specialist knowledge for the practical training was already imparted. Depending on the framework conditions, the lectures were held both online and in person, while the practical training was always completed in the university's offices. The structure of the format, including the content covered in each case, is shown in Table 5.1.

Table 5.1.: Topics and contents of the *Applied Physics / Hands-on Physics* practical training

Topic	Contents
Part 1	
Introduction	Introduction, SI units
Electronics	<u>Lecture 1:</u> Semiconductor physics, basics of electronics <u>Lecture 2:</u> Semiconductor physics, basics of electronics <u>Practical training 1:</u> Basics of controlling the Arduino with Python <u>Practical training 2:</u> Basics of controlling the Arduino with Python
Measurement data acquisition	<u>Lecture 1:</u> Digital data acquisition: digital electronics, μ -controller, AD/DA converter <u>Lecture 2:</u> Digital data acquisition: digital electronics, μ -controller, AD/DA converter <u>Practical training 1:</u> Starting up a temperature sensor with the help of an Arduino [®] <u>Practical training 2:</u> Starting up a temperature sensor with the help of an Arduino [®]

Sensors	<p><u>Lecture 1:</u> Sensors: principles and techniques</p> <p><u>Lecture 2:</u> Sensors: principles and techniques</p> <p><u>Practical training 1:</u> Control of a CO₂ sensor or Hall effect sensor with the help of an Arduino[®]</p> <p><u>Practical training 2:</u> Control of a CO₂ sensor or Hall effect sensor with the help of an Arduino[®]</p>
Part 2	
Coherence	<p><u>Lecture 1:</u> Fundamentals of optical laboratories</p> <p><u>Lecture 2:</u> Laser Systems, Metrics & Coherence</p> <p><u>Practical training 1:</u> The function of optomechanical components & handling of optics Adjustment of optomechanical components</p> <p><u>Practical training 2:</u> Michelson-Morley interferometer</p>
Power	<p><u>Lecture 1:</u> Laser protection</p> <p><u>Lecture 2:</u> 3D printing technology</p> <p><u>Practical training 1:</u> Technical protection device: warning lamp, marking, structure photodiodes, SMD boards</p> <p><u>Practical training 2:</u> 3D-printing</p>

Frequency	<p><u>Lecture 1:</u> Spectroscopy: (i) Spectrometer basics (ii) Prism vs. grating spectrometer: Beam path; correlations: slit, line density, spectral range and optical resolving power, transmission properties (iii) Czerny-Turner imaging spectrograph, 'Blaze' grating, grating change (iv) 2-beam spectrometer</p> <p><u>Lecture 2:</u> CCD resp. CMOS cameras: (i) Function, manufacturing process, classification (ii) Characteristic parameters: Noise, resolution, spectral characteristic curve (iii) Timing properties of a USB CCD line</p> <p><u>Practical training 1:</u> Structure optical path spectrograph: (i) 3D printing of optomechanical components (ii) Adjustment of the beam path & setup of light protection (iii) Proof of function by measuring a light source (iv) Relationship of adjustable components with system specifications</p> <p><u>Practical training 2:</u> Characterization spectrograph: (i) Determination of grating constant, resolving power, SNR of the CCD line, the spectral range of the measuring system (ii) Fiber coupling study: effort versus benefit (iii) Study: From transmission measurement to absorption spectrum</p> <p>Characterization LASER: (i) Frequency determination (ii) Study: Determination of the coherence length from the line width</p>
Buffer appointment	

5.2. Lecture

After the students have completed Part 1 and the first two blocks of the second part, the last block of topics investigated the property of the frequency of light (see Table 5.1). Sections from the lecture notes can be seen in Fig. 5.1.

First, the lecture explains the relationship between the wavelength and frequency of different electromagnetic waves before the topic of color measurement is explained using different light sources, such as the sun, LEDs, or a laser. Particular focus is put on the laser, its mode of operation, and the linewidth of the resulting emission spectrum. Subsequently, the operation of spectral spectrometers is explained using prisms, and grating spectrometers before the experimental setup and operation of the Czerny-Turner spectrometer to be implemented in the

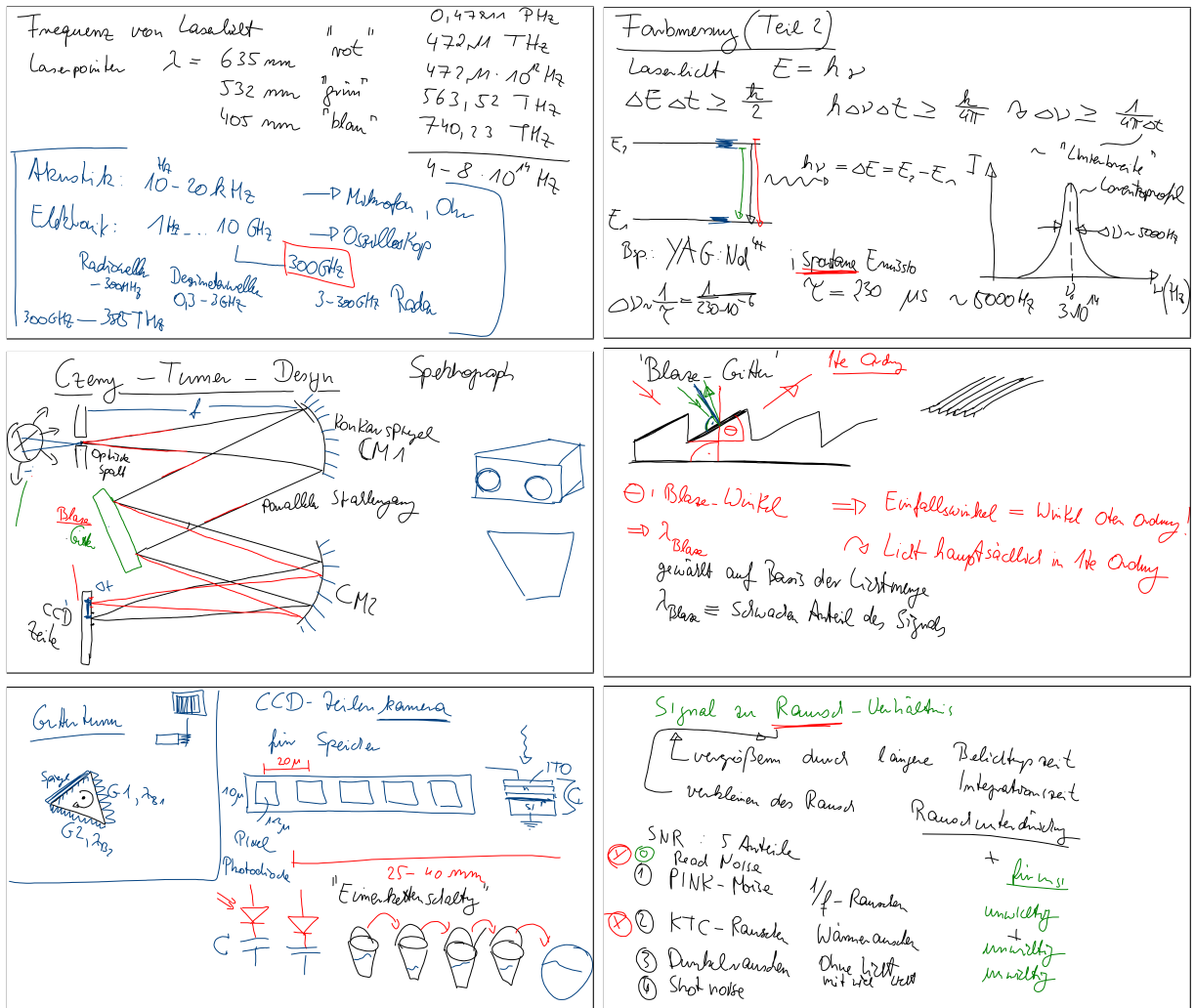


Figure 5.1.: Excerpts of the lecture slides from the lecture on frequency.

practical training is explained. Particular focus is put on reducing aberrations due to the imaging optics and increasing the resolving power. In addition, the functionality and usefulness of a blazed grating, which is also used in the practical training, is presented. At the end of the lecture, the operation of the detector used, a CCD line scan camera, will be explained. Furthermore, the CCD's Signal to Noise Ratio (SNR) and its origin are described in this context.

5.3. Practical training

The concept of the practical course after the lecture is that the students are given various tasks, e.g., the measurement of a light source with the spectrometer set up or the frequency determination of a laser with the help of the spectrometer (cf. Table 5.1). Implementing these tasks is entirely up to the students and should be based on what they have learned in the lecture. As is the case in conventional practical courses, a concrete script for the execution of

the experiments is not available. The students can exchange information during the practical training and exchange ideas on how to proceed. In addition, a supervisor is available, who can also be asked for help, although the students are encouraged to make as little use of this as possible.

During the practical training on the frequency of light, the students had all the necessary components to realize an Optocubes-based [45] C-T spectrometer. In addition to the mechanical components of the Optocubes framework, these include mirrors, gratings, CCDs, and their respective mechanical holders. Furthermore, to be able to use the spectrometer realized by the students flexibly, it was equipped with a light-tight housing, also based on Optocubes, so that the light available in the office does not influence the experiments. Fig. 5.2 shows the experimental setup realized by the students (the housing is open so that the internal setup of the spectrometer can be seen).

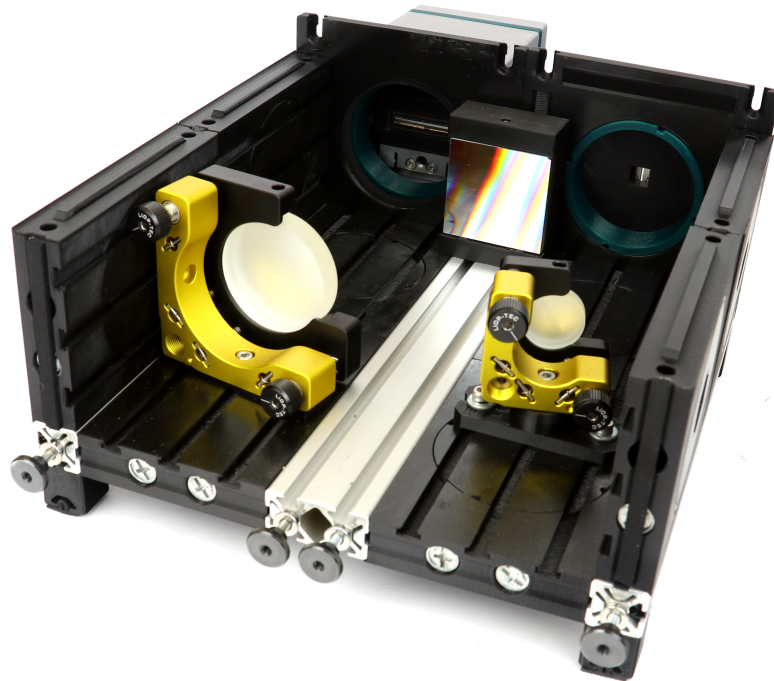


Figure 5.2.: Photo of the C-T spectrometer build using the Optocubes framework [45] and used by the participants of the practical training.

6. User Studies

After the presentation of the individual mediation formats for optical spectroscopy, an evaluation of the formats and, in particular, an impact study on the users of the DIY spectrometers is necessary. Since the format of a journal article has been established for decades and the format of the 1,000 Laser Hacks for Makers has already been evaluated in the work of Klompmaker [39] and Lager [30], the two practical training formats (at home and the university) are to be examined in this work. The main focus of the study, however, is on the impact of the DIY hardware since the practical training formats, in contrast to the hardware used, show only minor changes compared to conventional, practical training (location, task type, time allocation, Etc.).

The following section first describes the interview study that was conducted. This study has a pilot character, both for the practical training and for using a high-end DIY spectrometer based on LEGO[®]-bricks. The findings of this pilot interview study are then taken up in the questionnaire study and examined quantitatively. In contrast to the pilot study, a spectrometer based on LEGO[®]-bricks will no longer be used. However, a high-end DIY spectrometer based on the Optocubes framework [45] for reasons of accuracy and the time required for construction (for more information, see Section 6.1).

6.1. Interview Study

To verify the usability of the spectrometer build from LEGO[®]-bricks, to improve the building instructions, and most importantly, to evaluate the working experience with the spectrometer in practical training, an interview study with all participants is conducted and subsequently analyzed. The interview study is performed with three electrical engineering students the age of 22 to 25 in their fifth semester at the South Westphalia University of Applied Sciences.

6.1.1. Evaluation of the practical training and the used Open Hardware based spectrometer

After the students performed their last work phase and gave back all the materials, a guideline-based interview was performed with every student. The interview guideline was created following the rules suggested by Misoch [50] and can be found in section B.2. The interviews were recorded and afterward transcribed using the software f4transcript [51] following the simple transcription rules by Claussen *et al.* [52]. The transcribed interviews in their original language can be found in section B.4. Afterward, the transcribed interviews were analyzed using the software f4analyse [51] following the rules of a content structured qualitative content analysis by Kuckartz [53].

Before performing the content structured qualitative content analysis, case summaries (see section B.1) for every participant were created to support the development of the category system. Following that, the category system is created using an inductive category formation on the text [53]. The resulting category system can be found in section 6.1.3 and is used to analyze and categorize the transcribed interviews. One should note that the category *Improvemet*

(SK 3.2) is solely used to improve the building instructions of the spectrometer, which, after improvement, were used in the book of Osterheider *et al.* [29] and is of no further interest for the evaluation.

6.1.2. Aim of the evaluation & research questions

The aim of the qualitative interview study is, on the one hand, to evaluate the practical training at home compared to conventional, practical training at the university and to find possible preferences of the students. Furthermore, the self-built measurement system is to be evaluated additionally. Of particular interest is the evaluation of the spectrometer itself and its effect on understanding its physical functional principle. Furthermore, the extent to which students develop confidence in using the spectrometer will also be examined. These areas of interest lead to the following research questions, which the qualitative interview study will answer:

1. How do students evaluate a practical training at home?
2. How do students evaluate the self-built spectrometer?
3. To what extent do students trust the measurement system?
4. How do students feel about experimenting with the self-built spectrometer?
5. To what extent does working with the self-built spectrometer influence understanding its principle of operation?
6. To what extent do students develop confidence in using the spectrometer?
7. Do the students prefer a commercial or a Maker measuring system for experimenting, e.g., in practical training?

By answering the research questions, hypotheses are to be formulated, which will then make the initially exclusively qualitative results of the interview study accessible for quantitative testing. Since the self-built spectrometer is just as much a Maker spectrometer as, for example, an Optocubes-based spectrometer or an Arduino-based photometer, the findings of the qualitative interview study can also be applied to other Maker measuring devices, for this reason, the hypotheses are generally formulated for Maker measurement systems.

6.1.3. Category system

In the following table, the category system used to analyze and categorize the interviews can be seen. Since the interviews were conducted in German, all anchor examples have been translated into English. The original transcripts of the interviews can be found in section B.4.

	Category	Definition	Anchor example	Coding rule
PZ 1	Practical training in physics at home	All statements that refer to the practical training in general and occurring tasks.	"I would say that I quite liked the practical training at home. All in all, because it was something completely different, and you could somehow tinker with it a bit for yourself and also learn a lot of new things and so on." (Interview B3, lines 12-17)	
SK 1.1	Task	All statements that relate to the tasks in the practical training	So I really enjoyed the fact that you had to spend some time - relatively in-depth - with the subject, actually with the design, then looked at what - that is, the functional principle of the spectrometer there, that was also a task, I think, in phase two or three, that you actually had to describe the function of the individual components, that you had to think about it (...) [...]. (Interview B1, lines 148-153)	
SK 1.2	Interaction	Interaction during the practical training with other students or supervisors.	"If you now actually want to coordinate and think about with the, with the fellow students, how they did it, it's much easier when you're at the University, because or when you at least see each other directly, [...]" (Interview B3, lines 58-60)	

	Category	Definition	Anchor example	Coding rule
SK 1.3	Locality	Preferences for the location where the practical training will be carried out	"B1: I think I would rather do it at home then. I: For what reason? B1: (...) Yes (...). Yes, I think you just have a bit more peace and quiet there." (Interview B1, lines 43-45)	The category is not coded if statements are made regarding the interaction between students or students and supervisors; such statements are assigned to the category SK 1.2 .
SK 1.4	Time	Time spent and time management in the practical training at home	"What I liked was that you are a little bit freer in terms of scheduling, [...]" (Interview B3, lines 38-39) "What goes along with that is also a bit of my criticism of it and that is it is of course quite time consuming, [...]" (Interview B2, lines 19-21)	The category will not be coded if ... 1. statements are made about the interaction between students or students and supervisors, such are assigned to the category SK 1.2 . 2. statements are made about the locality are assigned to category SK 1.3 .
SK 1.5	Freedom of implementation	Freedom of implementation in processing the practical training tasks	"I liked the fact that you could try a little more, so you didn't have to stick strictly to a framework. And you could also see what it's like when you hold a sheet of paper in front of you with the gap, for example, or two - that was really cool. [...]" (Interview B2, lines 16-19)	

	Category	Definition	Anchor example	Coding rule
BP 2	Previous physics practical training	Contents and personal feelings concerning the previous physics practical training.	"In the physics lab and at university, you never really had to deal with the setup. It was always already finished, you only carried out one experiment and now that you actually have to adjust the things yourself (...). [...]" (Interview B1, lines 13-17)	
HLS 3	Handling of the spectrometer build from LEGO®-bricks	General aspects for handling the spectrometer	"Yes Handling I found was actually quite reasonable, so after it first - so the setting and such took a bit longer, of course, because you have done it now for the first time, but (...) that worked quite well. [...]" (Interview B1, lines 134-136)	The category is not coded if the statements contain personal attitudes related to the spectrometer, such are assigned to category ELS .
SK 3.1	Experience with LEGO® model's	Experience and confidence in building LEGO® model's	"So the experience with LEGO construction is now also a bit back, rather in primary school, but (...) yes at that time I have done relatively much with it, so it was now not completely new to build with LEGO®, that has also worked out quite well (...) yes so experienced LEGO® tinkerer (laughs)." (Interview B1, lines 52-55)	
SK 3.2	Improvement	Enhancement requests and suggestions regarding components of the spectrometer	"[...] the real crux of the matter was the holder of the laser pointer. It really frustrated me a lot, because (...) I felt that I just couldn't manage to place it in such a way that it stood on the LEGO® base plate and hit the gap. [...]" (Interview B1, lines 78-81)	

	Category	Definition	Anchor example	Coding rule
SK 3.3	Structure	Course of the assembly and quality of the assembly instructions	"Nope, it was a good tutorial I thought. So everything was good. I was able to set it up like this - I don't think I had any problems with the instructions. [...]" (Interview B3, lines 97-98)	
SK 3.4	Functionality	Evaluation of the functionality of the spectrometer components	"The functionality was very, I would rate as very good, so everything has definitely done what it should. Now it was with most parts only a horizontal rotation and maybe- ah or horizontal rotation and a movement, but yes all was very good." (Interview B2, lines 81-84)	
ELS 4	Personal attitude towards the spectrometer build from LEGO®-bricks	Personal feelings/attitudes regarding the spectrometer build from LEGO®-bricks.	"Yes (...) so now there I would not see the problem, so (...) so as said, now one has already the routine, now one knows where problems could occur, how one reasonably dose fine-adjustments that it - that one could- already get an idea, and it seems to function also so well that one would like to do further measurements with it." (Interview B1, lines 162-166)	The category is not coded if the statement evaluates functionality or handling of the spectrometer or its components; these are assigned to the HLS category.

	Category	Definition	Anchor example	Coding rule
SK 4.1	Recommendations	Recommendations to work with the spectrometer in a practical training.	"So I would recommend it, especially in physics, because (...) the experiments have always been relatively poor in the physics practical training, they were things like acceleration due to gravity - so (...) #00:12:43# Determining the gravitational force and stuff like that, that were just always magnetic beads or iron beads falling down, that wasn't really exciting, also with all the other optical things, which were, as I said, always already built up in such a way, you didn't really have to think about how the whole thing actually works in a deeper way. So I would recommend this to people for physics." (Interview B1, lines 184-192)	
SK 4.2	Private interest	Interest in experimenting with the spectrometer in a private setting.	"Oh, difficult, I wouldn't know what to put in a spectrometer (laughs) (...). Yes, I don't know, so in my spare time I wouldn't think that I would measure anything with it. (...)." (Interview B1, lines 195-197)	
VF 5	Understanding the principle of operation	Factors influencing the understanding of the principle of operation of the spectrometer	"Yes, so I must say in any case that I found the CD quite-quite-quite impressive, that it simply worked with the CD as a grid, yes. So that definitely gave me a broader understanding." (Interview B2, lines 192-194)	

	Category	Definition	Anchor example	Coding rule
SK 5.1	Task	Explicit gain in understanding due to the nature of the task in the practical training	"I think I just mentioned that a little, so in any case very very very good, because of the fact, for example, it was a question investigated with a self-selected experiment. Even if you don't come up with an experiment yourself, you first try it out, then maybe you Google it or look at the literature differently, and that alone keeps you so busy with spectrometers that it definitely helped a lot." (Interview B2, lines 182-188)	
TLS 6	Suitability of the spectrometer	Suitability of the spectrometer for practical application	"So I think that it already works sufficiently well, so you have seen only- so you have seen the spectra for the LEDs, they already looked approximately as the things that you can find on the Internet, so it looked already sufficiently accurate that you could also determine other things with it, [...]" (Interview B1, lines 230-233)	The category is not coded if the statement makes a comparison with commercial spectrometers; these are assigned to the category VMS .

	Category	Definition	Anchor example	Coding rule
SUS 7	Confidence in using the spectrometer	Self-assessments of skills in using the spectrometer.	<p>"[...] what- what I trust a commercially available device more, than the spectrometer, is the adjustments I have made, which is yes first of all most likely to be worse than in most commercial devices, [...]" (Interview B2, lines 234-237)</p> <p>"[...] So I think the biggest source of error is also in front of the device and not in the device or does the device represent a source of error, so I would trust both devices relatively equally (laughs)." (Interview B1, lines 263-265)</p>	

	Category	Definition	Anchor example	Coding rule
VMS 8	Comparison of measuring systems	Comparisons between measurement systems build from LEGO [®] -bricks and commercial measurement systems.	<p>"[...] So I think that is actually already suitable for experiments (...) yes, that is now perhaps not exactly as accurate as a ready-bought x 1000 Euro spectrometer is of course also somewhere (...) already so included in the whole story, but is already sufficiently good, I think." (Interview B1, lines 238-241)</p> <p>"Okay, I think a commercial spectrometer is of course probably much more expensive, but I think so- so small things (...) would be somehow of course- better mechanically mounted, because it is otherwise simply partly not possible with LEGO. So somehow some parts have some tolerances, or somehow, that just, that you do adjustments yourself. [...]" (Interview B3, lines 177-182)</p>	<p>The category is not coded if ...</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. the comparison refers to a preference in the future use of the measurement system, these are assigned to the category ZWM. 2. the comparison refers to the accuracy of the data of the measuring system; these are assigned to the category VDM.

	Category	Definition	Anchor example	Coding rule
ZWM 9	Future choice of the measurement system	Preference of measurement system (commercial or self-built) for future practical training.	<p>”I think I would take the self-built one (laughs), because I think it’s more fun to build it up and fine-tune it than to have it ready and then just measure it, I think it’s more fun that way. [...]” (Interview B1, lines 172-175)</p> <p>”[...] I would still probably opt for a commercial measuring device, because I always find it good, even now with regard to after graduation, if you have already seen a real measuring device and then not somehow when you have to do with it then in professional life, there completely clueless presides, [...]” (Interview B2, lines 140-144)</p>	
VDM 10	Trust in the data from measurement systems	Trust in the measurement data or assumed measurement accuracies of measurement systems		The category is not coded if the cause of lack of confidence is given as errors in adjustment or similar, these are assigned in the category SUS .

	Category	Definition	Anchor example	Coding rule
SK 10.1	Commercial spectrometers	Trust in the measurement data from commercial spectrometers	”Since I’ve never worked with such a thing before, I’m going on the assumption that (...) they’re specially designed for this purpose and LEGO [®] isn’t necessarily (laughs) designed for such a purpose and I think they’ll also be standardized somehow and somehow specially calibrated so that they’re really accurate. [...]” (Interview B3, lines 313-317)	
SK 10.2	Spectrometer build from LEGO [®] -bricks	Trust in the measurement data of the spectrometer build from LEGO [®] -bricks	”[...] Otherwise, I would say, maybe it’s not something for (...) for a highly scientific application, but in a student context, in the context, in the context of a practical training, it’s definitely pretty good, so I’ve used measuring devices in other labs, in other practical trainings, I think, that gave worse results (laughs).” (Interview B2, lines 220-224)	

6.1.4. Category based evaluation

Practical training in physics at home (PZ)

In general, the students evaluated the practical training at home in its entirety positively. The primary reasons given by the students are the intensive work with the spectrometer and its components (cf. I. B1, lines 148-159) and the possibility of setting up the spectrometer independently (cf. I. B1, lines 12-17). In addition, it is stated that the practical training or its contents are something different and creative (cf. I. B2, lines 12-13).

Task (SK 1.1)

The tasks in the practical training at home are evaluated positively by the students. Particularly emphasized are tasks for the characterization of individual components and the subsequent adjustment of the spectrometer (cf. I. B1, lines 20-27 & 148-159). Furthermore, the students positively emphasize tasks that, in terms of content and subject, go beyond what is covered in the regular course of study, such as determining the concentration of an unknown solution (cf.

I. B1, lines 148-159). It is justified by the fact that such tasks are applications from industrial practice (cf. I. B2, lines 107-124).

Interaction (SK 1.2)

The students criticized all the communication with each other and with the practical training supervisor (cf. I. B1, lines 35-38; I. B2, lines 16-26; I. B3, lines 57-72). An exchange among each other was possible using messenger services, but communication via these services proved to be difficult (cf. I. B3, lines 57-72). In addition, it is expressed in interview two that due to the first-time implementation of the practical training, a special amount of time was necessary to work on the tasks since there was no possibility of getting in contact with higher semesters who had already completed the practical training (cf. I. B2, lines 16-28).

Locality (SK 1.3)

Regarding favoring the location of future practical training, the students express different opinions. Two students named the university the preferred location (cf. I. B2, lines 30-37; I. B3, line 135). It is justified on the one hand by the time expenditure of the practical training at home, which is not like the usual practical training that ends after 1.5 hours (c.f. I. B2, lines 30-37), on the other hand, the cooperation aspect, which is facilitated at the university, is indicated as a reason (see I. B3, lines 57-72). In interview 1, the student initially expresses neutrality and does not indicate a preference regarding the location. However, if he had to decide, he would prefer practical training at home, based on the fact that he has more peace and quiet at home when experimenting than in the university (cf. I. B1, lines 39-45).

Time (SK 1.4)

The time required for the practical training at home is evaluated differently, as is the location. Two students positively emphasized the free allocation of time. The reason for this is, on the one hand, the possibility of intensive occupation with the spectrometer (cf. I. B1, lines 20-27) and, on the other hand, the free time allocation of the individual experiments or task parts (cf. I. B3, lines 38-56). One of the students criticizes a large amount of time required for the practical training but also points out that this time requirement would be fine if only one practical training of this scope were offered per semester (cf. I. B2, lines 40-43).

Freedom of implementation (SK 1.5)

Initially, the students evaluated the free design of the task positively, as they could experiment freely with the components and the spectrometer without having to follow step-by-step instructions (cf. I. B2, lines 16-27; I. B3, lines 38-54). In interview 3, in addition to the positive factors, the criticism of the free implementation is that due to the lack of interaction possibilities and a lack of step-by-step instructions, any processing errors that occur can only be noticed after a longer period (I. B3, lines 38-54).

Previous physics practical training (BP)

The students express themselves differently concerning their previous practical training in physics at the university. While the students in interviews 1 and 3 evaluate the course and the time allocation (cf. I. B1, lines 12-17; I. B3, lines 38-54 & 236-253), the student in interview two comments exclusively on the temporal scope of the practical training (cf. I. B2, lines 30-38).

In interview 3, the student criticizes the time frame of the previous practical training of 1.5 hours per practical training "because it is sometimes a bit difficult" to manage the experiments within the given time (cf. I. B3, lines 38-54). Furthermore, the students criticized the type of tasks, in which the structure of the experiments was never discussed (cf. I. B1, lines 12-18) and completed without learning the content (cf. I. B3, lines 236-253).

Handling of the Spectrometer build from LEGO[®]-bricks (HLS)

The students describe the handling of the spectrometer as "actually quite reasonable" (I. B1, lines 134-142). Despite the initially good evaluation, the students express problems with its handling, which refers to both the setup and the adjustment of the spectrometer. In interview two, the student mentions problems with the adjustment of the spectrometer, which he justifies with the fact that the light sources "had quite a lot of tolerances" (I. B2, lines 89-100) and thus the positioning of the light on the CCD was made difficult (cf. I. B2, lines 89-100). Another student states in interview three that problems were mainly caused by the fact that it needed to be completely known what the final adjusted spectrometer had to look like (cf. I. B3, lines 138-150). Following the criticism, the students relativized their criticism a little and emphasized again that the handling of the spectrometer was good (cf. I. B2, lines 89-100; I. B3, lines 138-150).

Experience with LEGO[®] models (SK 3.1)

All the students had previous experience with LEGO[®] models prior to the practical training, and for all the students, this was during their childhood (cf. I. B1, lines 52-55; I. B2, lines 50-55; I. B3, lines 87-93). Two students rate their current knowledge in building LEGO[®] models as quite good (cf. I. B1, lines 52-55; I. B3, lines 87-93). One of the students states that he knew how LEGO[®] bricks have to be assembled in principle so that they are stable, but apart from that, he did not have much experience (I. B2, lines 50-55).

Improvements (SK 3.2)

All students express several problems with handling some components of the spectrometer. The students are most critical of the holder for the laser pointers, which has too many tolerances, making perfect positioning of the laser pointer difficult (cf. I. B1, lines 58-88; I. B2, lines 67-72; I. B3, lines 19-29). In addition to the criticism of the mounting of the laser pointer, the students express criticism concerning the linear translation of the small mirror holder, which loosens from its anchorage due to the strong pull of the attached rubber bands (cf. I. B1, lines 58-88; I. B2, lines 67-72; I. B3, lines 122-132). In Interview 3, the student expresses two other requests for improvement, one regarding the guidance of the gap and one regarding the rotation mechanism of the large mirror holder. The student expresses that in the instructions of the gap, a component was placed in a way that implied a connection with another component, which was not present in the real component (cf. I. B3, lines 103-117). Regarding the large mirror holder, he notes that the fixation of the rotating mechanism needs to be fastened better so that the mirror holder jumps back to its original position (cf. I. B3, lines 177-198).

Structure (SK 3.3)

The assembly instructions for the components of the spectrometer, as well as the assembly of the spectrometer from the components, are described by the students as "very good, very

detailed” (I. B2, lines 75-76) (cf. I. B1, Z. 90-98; I. B2, Z. 89-100; I. B3, Z. 97-101). Furthermore, one of the students in Interview 1 comments on the brief instructions for adjusting the spectrometer in addition to the assembly instructions. “[...] having these short instructions on how to adjust the spectrometer, that was already explained so well.” (I. B1, Z. 90-98).

Functionality (SK 3.4)

”The functionality was very, I would rate as very good so everything definitely did what it was supposed to.” (I. B2, lines 81-84). Like the student in interview B2, the other students also rate the functionality of the components for the task as sufficient (I. B1, lines 104-129; I. B3, lines 133-135).

Personal attitude towards the spectrometer build from LEGO[®]-bricks (ELS)

The students evaluate the work with the spectrometer built from LEGO[®]-bricks throughout very positively (I. B1, line 145; I. B2, line 104; I. B3, lines 155-156). One student describes the work as interesting (cf. I. B2, line 104). All students could also imagine working with the LEGO[®]-brick-based spectrometer again in future practical training. Differences between the students in this respect appear especially in the justification for this decision. At the same time, one of the students justifies his decision by saying that after this practical training, he had experience in setting up and adjusting the spectrometer and could assess where problems occurred, so he would like to continue working with the spectrometer (cf. I. B1, lines 162-166). In contrast, the other students mention conditions that should be fulfilled to work with the spectrometer in future practical training. The student in interview 2 says: ”Yes, but then I would have to build it again, that would be totally stupid (laughs).” (I. B2, lines 127-128) while it is important to the student in interview three that the practical training does not retake place during the semester break, but during the regular semester (cf. I. B3, lines 160-169). Following these conditions, both students would like to work with the spectrometer again under these circumstances.

Recommendations (SK 4.1)

Two of the students state that they would recommend fellow students to work with the self-built spectrometer in a practical training (cf. I. B1, lines 184-192; I. B2, lines 147-156), while one of the students states that he has already made various recommendations to fellow students (cf. I. B3, lines 205-220). The reason for the recommendation differs between the students. The student in interview 1 states that the recommendation is mainly motivated by the previous physics practical training, which this student criticizes. He states that the experiments were “[...] not exciting [...]” (I. B1, lines 183-192) and that the optical experiments were always preassembled so that he did not have to think about the functional principle of the experiment (cf. I. B1, lines 183-192). In contrast, the student in interview 2 states that he would recommend experimenting with the spectrometer, as this would provide a much deeper insight into the understanding of the functional principle and a much clearer understanding of how the individual components of the spectrometer work (cf. I. B2, lines 151-156). In contrast to the others, the third student justifies his recommendation primarily with his enjoyment during the practical training. Another reason for the recommendation is the number of topics covered (cf. I. B3, lines 205-220).

Private interest (SK 4.2)

Despite the positive evaluation of the self-built spectrometer and the recommendation to other fellow students, all students stated that they were not interested in working with the spectrometer in their spare time. The students in interviews 1 and 3 argue that the experimenting had been fun, but their private interests lay in other areas (cf. I. B1, lines 195-198; I. B3, lines 225-230). The same is true for the student in Interview 2. Subsequently, he adds that he could imagine that students with a private interest in optics would also experiment with the spectrometer in a private context (cf. I. B1, lines 195-198).

Understanding the principle of operation (VF)

Although all students state that the work with the self-built spectrometer strongly promoted the understanding of the functional principle of the spectrometer, the statements on the experiments/components that were decisive for the understanding differ in some points. For example, the student in interview one states that the experiments using the entrance slit helped to understand how to adjust the spectrometer (cf. I. B1, lines 204-213). However, the student in interview two states that experimenting with the grating and using a CD helped him better understand how a spectrometer works. The following statement highlights this: "Yes, so I have to say in any case quite- quite- quite the CD was quite impressive, that- that it simply worked with the CD as a grating, yes. So that has definitely already given me a broader understanding." (I. B2, lines 192-194). Two students (B1 & B2) additionally state that the coverage of angular dispersion and linear dispersion helped build a profound understanding of the processes in the spectrometer (cf. I. B1, lines 204-213; I. B2, lines 107-124). In contrast to the students in Interviews one & two, the student in Interview three does not directly tie his understanding to an experiment or phenomenon but instead emphasizes that he took away a lot through free experimentation and his error analysis (cf. I. B3, lines 262-272).

Task (SK 5.1)

All students stated that the open task design in the practical training led to them developing a comprehensive understanding of the physical background of the spectrometer. The students attribute this to two factors in particular. The students in interviews one & three explain that they were motivated to investigate the phenomena covered in additional literature (cf. I. B1, lines 218-227; I. B3, lines 262-272). In interviews two & three, however, the students report that problem-oriented tasks helped them to develop a deeper understanding of the topics covered (cf. I. B2, lines 204-213; I. B3, lines 236-253), which is again justified by further research on the Internet or in the according literature (cf. I. B2, lines 182-187).

Suitability of the spectrometer (TLS)

The spectrometer is assessed by the students as suitable for a practical application. However, they explicitly mention the areas of application in the same context so that only limited conclusions can be drawn about the assessment of its general suitability. Two of the students consider the spectrometer well-suited for applications in which a continuous spectrum is registered over the entire range of the CCD (cf. I. B1, lines 230-241; I. B2, lines 199-209). It is especially evident from the following statement: "Yes, but this- so everything that goes, let's say, over the complete spectrum and the complete bandwidth of the CCD, I could definitely recommend this, it was pretty good, yes I would judge this as pretty good." (I. B2, lines 199-209). While

the student in interview two does not give further reasons for this assessment, the student in interview 1 states his measurement results corresponding to data found on the Internet. For this reason, the spectrometer should also be suitable for different measurements (cf. I. B1, lines 230-241). Both students also consider the spectrometer quite useful for determining unknown concentrations of a known solution. Both justified this with the results obtained, which were in the same order of magnitude as the reference measurements (cf. I. B1, lines 230-241) and would support the results from previous parts of the task (cf. I. B2, lines 199-209).

Confidence in using the spectrometer (SUS)

The student's confidence in using the spectrometer can be interpreted negatively and positively. All students stated that the user is the biggest factor in the measurement inaccuracy of the spectrometer. The following statement underlines this statement in particular: "So I think the biggest source of error also lies before the device and not in the device [...]" (I. B1, lines 261-266). The students justify the emergence of these inaccuracies with inadequately made adjustments or badly determining characteristics of the spectrometer (see I. B1, lines 261-266; I. B2, lines 216-214; I. B3, lines 292-308). To this, the student in interview three adds that tolerances in the components largely cause the faulty adjustments (cf. I. B3, lines 326-335; cf. Handling the spectrometer - improvements (SK 2.2)). The student in Interview 2 also expresses that increased accuracy with commercial spectrometers originates from a lack of adjustability (cf. I. B2, lines 229-241). Despite the students' uncertainty concerning the setting and adjustment of the spectrometer, all students expressed that they would be confident to work on an unknown task with the spectrometer (cf. I. B3, lines 326-335). One of the student's reasons for his assessment was that he had obtained a feeling for the internal principle of function through the previous experiments and could solve new tasks without any problems (cf. I. B1, lines 274-283). In interview two, the student states: "I would definitely have confidence in myself because I have already spent so many hours with the spectrometer. So I think- yes, I think now I could also do other things that are described, if I know what there, what the, what I want to do with it, what I want to measure with it, now I could definitely use the spectrometer again and again." (I. B2, lines 245-249).

Comparison of measuring systems (VMS)

All students consider a commercial measuring system more accurate than a self-built one (cf. I. B1., lines 162-166; I. B2, lines 229-241; I. B3, lines 277-288). One of the reasons given by the students is the error-prone self-adjustment of the spectrometer (see confidence in using the spectrometer (SUS)). The student in interview B3 states that the better measurement accuracy of a commercial spectrometer originates from the better implementation of its mechanical components since these would not show tolerances as the self-built spectrometer (cf. I. B3, lines 277-288). In addition to the measurement accuracy, two students also emphasized that a commercial spectrometer would be much more expensive than the self-built variant (cf. I. B1, lines 230-241; I. B3, lines 177-198). This assumption is not substantiated by the students at any point, indicating that the students' statements are only based on assumptions.

Future choice of the measurement system (ZWM)

In future practical training, the students would choose a commercial if they had to decide between a commercial and a self-built measurement system. One of the students states that

although the spectrometer has awakened a certain "play instinct" in him and "is pretty cool", he would still choose a commercial measurement system. He justified this by saying that he thought it would be good to work with a commercial measuring instrument during his studies so that he would not face a commercial measuring system for the first time in his subsequent professional life (cf. I. B2, lines 138-146). In contrast, the other students expressed they would choose a self-built measurement system again in future practical training, with the student in Interview 1 stating as a limitation that he would only choose a self-built one if he had never used it before. He reasons that building and adjusting the measurement system is more enjoyable than performing measurements exclusively with a commercial device. In addition, he states that it is challenging to set up and adjust the same measurement system several times (cf. I. B1, lines 148-159). The student in interview B3 considers a commercial measuring device more user-friendly but would opt for a self-built one (cf. I. B3, lines 162-166). He justifies this as follows: "Exactly, just a bit out of the play instinct (laughs)." (cf. I. B3, lines 172-181).

Trust in the data from measurement systems (VDM)

The student in interview two states that the measurement accuracy of the spectrometer is approximately the same as that of a commercial spectrometer. However, he does not give further reasons for this assumption. Regarding measurement accuracy, he trusts the stated measurement uncertainty (cf. I. B2, lines 228-241). The other students do not express general statements about trust in the data of measurement systems.

Commercial spectrometers (SK 10.1)

The students in interviews one & three expressed their trust regarding the data obtained by a commercial spectrometer. Both state they would trust the measurement data but reason differently. While the student in interview one exclusively states that a commercial spectrometer costs a multiple of the self-built one and, therefore, should also be more accurate (cf. I. B1, lines 261-266), the student in interview three states that commercial spectrometers are designed, calibrated and standardized for special applications. Following this reasoning, he directly relativizes his argumentation by pointing out that he had not yet worked with such a spectrometer (cf. I. B3, lines 313-318).

Spectrometer build from LEGO[®]-bricks (SK 10.2)

The student in Interview 1 states that he trusts the data obtained by spectrometer built from LEGO[®]-bricks. He justifies this by arguing that his determined measurement data would agree with his theoretical calculations up to the third decimal point (cf. I. B1, lines 246-257). In contrast, the student in interview two states that the measurement data of the spectrometer are sufficient in a student context. However, for an application in the scientific or industrial field, the accuracy of the spectrometer may not be sufficient. In addition, he adds that he has already worked with commercial measuring instruments in practical training, which had a lower measuring accuracy than the self-built spectrometer (cf. I. B2, lines 216-224). These statements clearly emphasize that the students principally trust the data of the self-built spectrometer but assume that they are more error-prone than those of a commercial spectrometer.

subsectionResults In order to achieve the main goal of the interview study, the formulation of hypotheses for further research first, the research questions must be answered. The answers to the research questions are then used to derive the hypotheses that can be used to evaluate future

practical training (at home) and Maker measurement systems, e.g., using a questionnaire. The hypotheses covering the spectrometer build from LEGO[®]-bricks are, if possible, formulated in a way that Maker measurement systems, in general, are addressed, resulting in the hypothesis being able to be verified aside from the spectrometer.

Any suggestions regarding improvements to the design of the spectrometer components were assessed and implemented. However, since these are not covered by the research question and serve solely to optimize the spectrometer build with LEGO[®]-bricks and accompanying components (e.g., light source mounts), they will not be revisited in the discussion of results.

1. How do students evaluate a practical training at home?

The practical training at home is predominantly well-received by the students. Problem-oriented tasks and tasks for characterizing the system's components lead to an intensive occupation with the system. Additionally, the students rate interdisciplinary tasks remarkably well beyond the pure occupation with the measuring system itself. By carrying out the practical training at the students' homes in combination with an open task design, the possibility of free time allocation arises, which the students evaluate positively. However, it can also lead to a sprawling amount of time, far exceeding conventional, practical training. The possibility of interaction with other students or supervisors during the practical training is criticized because it is strongly impaired by the exclusively digital communication, resulting in arrangements and, in particular, further inquiries sometimes taking several days. Based on the results, no directly clear preferences of the students regarding the location can be identified. For reasons of time and interaction, most participants in the interview study prefer practical training at the university.

From these results on the practical training at home, the following hypotheses can be derived, which can be quantitatively investigated in follow-up studies:

H1: The students prefer open tasks.

H2: Students prefer free time management in the practical training to a strict schedule.

H3: The time scope of the practical training should correspond to that of commercial ones.

H4: A practical training at the university/college is preferred to a practical training at home.

2. How do students evaluate the self-built spectrometer?

The self-built spectrometer is overall rated positively by the students. This general evaluation can be divided into several subcategories named by the students. One of these categories is the spectrometer assembly using a construction manual. Although students indicate varying levels of knowledge in building LEGO[®] models, the instructions for building the spectrometer are consistently rated as very good. Another subcategory is the functionality of the spectrometer or its components. The students evaluate the functionality of the individual components and the spectrometer based on the tasks to be accomplished in the practical training. Just like the assembly instructions, the functionality is also rated positively. The last subcategory named is the handling of the spectrometer. In addition to the actual handling of the spectrometer during experiments, the students also rated the adjustment and its instructions. The students evaluate the general handling as well as the adjustment and the instructions positively. Criticism regarding the handling due to nonoptimized components is afterward directly put into perspective by the students.

With the help of these evaluations, the following hypotheses can be formed, which relate to Maker measurement systems in general.

H5: Setting up a Maker measurement system is not a major challenge for users.

H6: Handling a Maker measurement system is not a problem for the users.

3. To what extent do students trust the measurement system?

The spectrometer is assessed as suitable for practical applications, although explicit examples are given in this respect. Based on this, it is therefore not possible to make a direct statement about the student's assessment of the general suitability of the measurement system for a practical application. This assessment is accompanied by the student's confidence in the data obtained by the self-built spectrometer. The student's confidence in the data obtained by the spectrometer is generally present but varies in degree. On the one hand, extensive confidence in the measured data is expressed, which is justified by the consistency of the measured data with theoretical calculations. On the other hand, a certain skepticism is shown by some students toward the measured data. This skepticism results in the self-built spectrometer assessment not being suitable in professional areas due to its measurement accuracy. In contrast, the students trusted the measurement data of a commercial spectrometer more extensively. It is important to note that none of the students had previously worked with a commercial spectrometer at the time of the interview. The trust placed in the commercial spectrometer is based primarily on the accuracy specifications of the manufacturer and on the price of the commercial spectrometer.

Using the gathered knowledge, the following hypotheses can be formulated for the confidence in the data obtained by Maker measurement systems:

H7: The accuracy of the Maker measurement system is judged by users to be limited compared to a commercial alternative.

4. How do students feel about experimenting with the self-built spectrometer?

The students describe experimenting with the self-built spectrometer as very interesting, with a generally positive evaluation throughout regarding the experimenting. The students also stated they would like to work with the spectrometer again in future practical training. In contrast to the consistently positive attitude towards experimenting with the spectrometer, the students set up conditions for renewed experimentation. One condition mentioned, which explicitly refers to the measuring system as such and not to the framework of the practical training, is the system's setup. For a renewed experimentation, the spectrometers should come already constructed since a renewed construction would offer no additional value and would still require much time. Besides their interest in experimenting with the spectrometer, the students also unreservedly recommend their fellow students to work or experiment with the spectrometer in a practical training. It becomes clear that the enjoyment during the practical training is decisive for recommending itself to other students. Despite the positive attitude towards working or experimenting with the spectrometer, none of the students can imagine experimenting with the spectrometer in a private environment. From the interviews, it becomes clear that this is mainly because the private interests of the students have little or no subsection with the thematic focus of the spectrometer.

Through these findings, the following hypotheses can be derived:

H8: Users enjoy working with Maker measurement systems.

H9: The Maker measurement system motivates users to want to continue working with the measurement system.

H10: The users of the Maker measurement system are not interested in a private occupation with the measurement system.

5. To what extent does working with the self-built spectrometer influence understanding its principle of operation?

All students stated that working or experimenting with the self-built spectrometer has dramatically enhanced their understanding of the principle of operation. Based on the results, it is clear that the enhanced understanding of the principle of operation has several causes. One of the causes is the characterization of the individual components, which leads to the students' better understanding of the function of the components individually and collectively in the measurement system. A further cause for the comprehensive understanding is the occupation with theoretical backgrounds, e.g., measurement accuracy or similar, and the following examination of theoretical considerations and experimentation with the setup. Last but not least, problem-oriented tasks also influence the students' understanding. They promote free experimentation and further literature research while offering the possibility to perform error analysis and implement procedural improvements that practice scientific work.

The following hypotheses can be derived from the findings on the factors influencing the understanding of the principle of operation, which can be generally used to investigate Maker measurement systems.

H11: Working with Maker measurement systems enhances the perceived understanding of the underlying functional principles of the measurement system.

6. To what extent do students develop confidence in using the spectrometer?

Confidence in using the self-built spectrometer can be divided into two distinct areas. One of the two areas represents working on a new unknown task using the spectrometer. After the practical training, the students state that they can successfully work on new and unknown tasks using the spectrometer. Judging from the interviews, it is clear that the self-confidence originates from the fact that the students have become more experienced in using the spectrometer through the practical training and from the fact that the students have internalized the functional principle of the spectrometer. The second area of confidence in working with the spectrometer seems contractionary to the abovementioned confidence. Regarding the measurement accuracy and the adjustment of the spectrometer, all students stated that the most significant inaccuracies were caused by poorly made adjustments or the inaccurate determination of essential parameters of the spectrometer. Despite the apparent contradiction of the two areas, the experimental experience combined with the error reflection seems to have ensured that the students have developed a certain confidence in using the spectrometer.

Concerning confidence in using Maker measurement systems, the following hypotheses can be derived from the results:

H12: Working or experimenting with Maker measurement systems promotes the self-concept of working with scientific measurement systems.

7. Do the students prefer a commercial or a Maker measuring system for experimenting, e.g., in a practical training?

There is no clear preference of the students regarding the choice of the measurement system. One of the students would prefer to work with a commercial spectrometer in future practical training to gain experience working with a commercial system to assist him in his future professional life. The other students, however, prefer to work with the self-built spectrometer in future practical training. The reasons for this decision are complex and consist mainly of the perceived enjoyment of experimenting with the spectrometer.

Based on these findings, the following hypothesis can be derived:

H13: Working or experimenting with a Maker measurement system is preferred to working with, for example, a commercial measurement system.

6.1.5. Discussion and limitations

Three students participated in the practical training at home and the consecutive study. The aim was to investigate the students' perceptions of the practical training and its tasks and to determine their basic attitudes towards working with Maker-based measurement systems (in this case, a LEGO[®]-brick-based spectrometer). In order to achieve this, the students were interviewed and recorded. All interviews were performed using a guideline to ensure comparability between each interview.

The evaluation shows that the students prefer to work on open tasks with free time management when attending a practical training. Furthermore, the interview analysis shows that the university/college is the preferred location for a practical training due to the opportunity to interact directly with other students and supervisors. It is interesting to note that students wish the time scope of the practical training correspond to that of conventional ones while, as noted earlier, preferring free time management. These two statements may or may not conflict with each other, depending on the student's schedule. Therefore, care should be taken for future practical training to ensure they are carried out at the university/college and that the time spent on the open tasks corresponds to that of a conventional practical training.

The interview analysis shows that setting up and handling the self-built spectrometer did not present a challenge to the participants. The students enjoyed working with the spectrometer and are willing to use it in further studies. Moreover, the analysis suggests that working with the self-built spectrometer enhances the perceived understanding of its underlying functional principles. Working with the spectrometer might promote the ability self-concept in this area. The students prefer working with the self-built spectrometer over a commercial one, even though the students judge the system's accuracy to be worse/limited compared to commercial alternatives.

Regarding the study's limitations, one should note that the small number of participants ($n = 3$) and their demographic similarities (same age, gender, and educational level) only enable the formation of general ideas or hypotheses. Furthermore, the interviews were conducted in German and translated into English in the subsequent analysis, which cannot completely rule out the opportunity of possible errors in translation inaccuracies. That being said, the margin

of error in the analysis due to eventual translation errors can be assumed to be very small and, therefore, negligible.

In conclusion, the students positively evaluated the practical training and the work with the self-built spectrometer. They, therefore, presented a valuable alternative to conventional practical training with fixed tasks (closed design), schedules, and commercial measurement systems. The insights obtained by answering the research questions are used to create a hypothesis (**H1-H13**) that will be checked in the following questionnaire study.

6.2. Questionnaire Study

Following the question study described in section 6.1, the hypotheses raised in this section concerning the design of the practical training and the Maker-based measurement system need to be examined in more detail. For this purpose, a questionnaire study was conducted with all participants of the second iteration of the online practical training (see section 4.2) and the participants of the novel practical training at the university (see Chapter 5).

The aim here is not to verify or falsify the hypotheses established in the interview study but to gain an impression of the impact and usability of the various practical training concepts and the measurement system used.

In order to ensure that the questionnaire can be used for further investigations of other novel practical training concepts and measurement systems beyond the subject area of spectroscopy, the items are designed in a way that always refers to Maker-based measurement systems. Thus, the questionnaire can also be used for investigations of, e.g., DIY interferometers without any problems.

In order to get a better overview of the hypotheses to be answered in the questionnaire study, they are listed again below.

- H1:** The students prefer open tasks.
- H2:** Students prefer free time management in the practical training to a strict schedule.
- H3:** The time scope of the practical training should correspond to that of conventional ones.
- H4:** A practical training at the university/college is preferred to a practical training at home.
- H5:** Setting up a Maker measurement system is not a major challenge for users.
- H6:** Handling a Maker measurement system is not a problem for the users.
- H7:** The accuracy of the Maker measurement system is judged by users to be limited compared to a commercial alternative.
- H8:** Users enjoy working with Maker measurement systems.
- H9:** The Maker measurement system motivates users to want to continue working with the measurement system.
- H10:** The users of the Maker measurement system are not interested in a private occupation with the measurement system.
- H11:** Working with Maker measurement systems enhances the perceived understanding of the underlying functional principles of the measurement system.
- H12:** Working or experimenting with Maker measurement systems promotes the self-concept of working with scientific measurement systems.

H13: Working or experimenting with a Maker measurement system is preferred to working with, for example, a conventional measurement system.

In the following sections, the study with design and results will be described before the chapter concludes with the discussion of results.

6.2.1. Design of the study

This section first presents the sample and the timing of the study, with test times and interventions. This is followed by a description of the instruments used.

6.2.1.1. Sample

The evaluation of the practical training and the Maker measurement system was carried out at two locations. The study was conducted from December 2019 to January 2022. The practical training was conducted at the University and the participant's home. The student's participation in the questionnaires was voluntary, and the information was processed anonymously.

A total of 43 (32.6% female) students participated in the study, of which 41 students completed a questionnaire at both test points and were thus included in the survey (response rate: 95.3%). The participants consisted of both pupils and students (51.2% students) at the age: of below 14 (9.3%), 15 - 19 (41.9%), 20 - 24 (27.9%), and 25 - 29 (20.9%).

6.2.1.2. Survey procedure

For the evaluation of the practical training, a non-randomized one-group plan with pretest, intervention, and posttest ("pre"-experimental design, type IV) was conducted [54]. Participants in the intervention primarily attended the intervention alone, with preparatory lectures conducted in various non-randomized groups. Since the study is a non-randomized study with only one group, the results must be interpreted with appropriate caution [54]. The participants carried out the systems construction and the associated experimental phases at home or at the university/college. In principle, interaction among the participants was possible at any time but was largely not perceived.

The data was collected with the help of a questionnaire. The pretest was distributed to and completed by the participants after the first introductory lecture. The pretest was used to collect the participants' prior experience directly before the intervention (if possible). After participants completed the practical training, they filled out the questionnaire with the posttest. Both the pretest and posttest were filled out online.

6.2.1.3. Test instruments

In order to test the hypotheses raised by the interview study, the practical training participants were asked to comment on pre-formulated statements. The results of these interviews are then bundled into scales and discussed with regard to the hypotheses.

The data for this study were collected at two test time points using a questionnaire. This contained 28 items at the first test time and 53 items at the second test time. The difference can be explained by the fact that at the second test time, statements were included which could not yet be answered meaningfully before the practical training. If there are no annotations in

the following tables, these items were used at both time points. Otherwise, the respective item indicates at which time it was used. In the appendix are the questionnaires of both test times (see section B.5 and B.6) in their original German versions.

The questionnaire can be divided into the following two areas corresponding to the different hypothesis derived from the interview study: Practical training items and Maker measurement systems items. In addition to these constructs, demographic data such as an anonymous assignment code, age, gender, and occupation were collected. The items on the above constructs were on a six-point Likert scale. The scale ranged from 1 = strongly disagree, to 6 = strongly agree. Due to the fact that there is scale, participants were forced to either agree or disagree with the statement. Individual items were inverted. This was done either for reasons of better readability or to check the response behavior. For the evaluation, such items were inverted again, so that the alignment corresponds to the other items of the construct. The individual constructs with the corresponding items (translated from German into English) are presented below.

Practical training

This area covers all hypotheses regarding the evaluation of the practical training itself, e.g., task design (**H1**), time management (**H2**), time scope (**H3**), and location (**H4**). These topics are of particular interest due to the practical training being new/different compared to conventional practical training. This is due to the Maker-based measurement systems and the flexible location (at home or the university). The items in this category are primarily evaluative and, except for the items in hypothesis **H1**, are used exclusively in the posttest. Because most conventional practical trainings rely on strict instructions with closed task design, the possible change of the preferred task type through the execution of the practical training must be considered.

Task design (**H1**):

Since the task design of a practical training is essential to the success of any practical training, there are four items in total to evaluate the task design, of which one is reversed. All items belonging to this hypothesis were originally designed for the questionnaire and can be found in the following table.

Table 6.2.: Items regarding the task design (H1).

Original	Items in questionnaire
-	In a practical training, I prefer to find a solution to the tasks myself.
-	I enjoy practical training the most when I can determine the process of working on the task myself.
-	I prefer to follow strict instructions point by point in a practical training. [inverted item]
-	Strict guidance in the practical training rather limits me in solving the tasks.

Time management (H2):

Since participants' time management during the practical training was already addressed several times in the interview study and was described as contradictory by the participants, two items are used to evaluate this part of the practical training (**H2**). In order to check the consistency of the participants' answers in this respect, one of the two items is formulated inverted. All items belonging to this hypothesis were initially designed for the questionnaire and can be found in the following table.

Table 6.3.: Items regarding the time management (H2).

Original	Items in questionnaire
-	Free time management is essential for me when experimenting.
-	I find it helpful to have a set time limit for each experiment. [inverted item]

Time scope (H3) & location (H4):

In contrast to the prior items, the items regarding the time scope and location could be answered by choosing between two options instead of a six-point Likert scale. This deviation is mainly due to the questions' simplicity, which does not require fine gradations in the answer. Both items were originally designed for the questionnaire and can be found in the following table, including their corresponding possible answers.

Table 6.4.: Items regarding the time scope (H3) and the location of the practical training (H4).

Original	Items in questionnaire
Time scale	
-	I find it problematic when the time commitment of a practical training at home exceeds that of a conventional practical training.
-	Possible answers: <input type="radio"/> Yes <input type="radio"/> No
Preferred location	
-	I prefer the following location to conduct this practical training:
-	Possible answers: <input type="radio"/> Home <input type="radio"/> University/College

Maker measurement systems hardware

This area covers all hypotheses directly regarding the hardware of the Maker measurement system, e.g., the setup of the said measurement system (**H5**), the handling (**H6**), and the judged accuracy (**H7**). Since all items cover the evaluation of the used hardware, the items of each hypothesis are only covered in the posttest. All items belonging to the hypothesis in this area

were originally designed for the questionnaire.

Setup of the Maker measurement system (Setup) (H5):

The setup of the Maker measurement system is essential to perform the assigned experiments. In order to be able to evaluate possible difficulties in setting up the device, two items in the questionnaire were dedicated to this purpose. The individual items are listed in the following table.

Table 6.5.: Items regarding the setup of the Maker measurement system (H5).

Original	Items in questionnaire
-	Setting up the measurement system(s) was easy for me.
-	The construction of the measurement system(s) did not cause me any problems.

Handling of the Maker measurement system (Handling) (H6):

The operation of the device was investigated using two items in the questionnaire. The items of this hypothesis were inverted to differentiate the items belonging to this hypothesis from those of hypothesis **H5** and to identify possible patterns in the completion of the questionnaire. They can be found in the following table.

Table 6.6.: Items regarding the handling and operation of the Maker measurement system (H6).

Original	Items in questionnaire
-	I had major problems operating the measurement system(s). [inverted item]
-	The handling of the measuring system(s) caused me difficulties. [inverted item]

Judged accuracy of the device (Accuracy) (H7):

Since the judged accuracy of the device is a rather complex topic to evaluate, the items, of which there are 10 in total, including one inverted, can be subdivided into three categories. The first category evaluates the custom adjustments of the students, which subsequently affect the device's accuracy. This category was investigated using four items, including the inverted one. The second category evaluates the judged accuracy of the device directly using five items. It is important to note that the accuracy of the system and the custom adjustments are evaluated solely based on the participants' perception without determining the factual accuracy or adjustment. The last category covers trust in the accuracy of the data obtained by a commercial device. The individual items are listed in the following table.

Table 6.7.: Items regarding the judged accuracy of the device (H7).

Original	Items in questionnaire
Custom adjustment	
-	I have adjusted the measuring system optimally. [inverted item]
-	The settings of the measuring system that I have made can definitely still be optimized.
-	I am the most significant error source in the measuring system's adjustment.
-	I am not sure if I have calibrated the measuring system well.
Accuracy of the measuring system	
-	The accuracy of the measuring system is worse compared to a commercially available measuring system of the same price.
-	The measurement results of the measuring system(s) are just as good as those of a commercial alternative. [inverted item]
-	I am skeptical about the accuracy of the measurement system.
-	I think that the measuring system is rather unsuitable for the professional field.
-	A self-made measuring system can only be inaccurate. After all, I am not a professional.
Trust	
-	I trust the data from a commercial measurement system without reservation.

Maker measurement systems perception

The last area covers all hypotheses connected to the student's self-perception during the practical training, e.g., enjoyment (**H8**), motivation (**H9**), private interest (**H10**), understanding (**H11**), self-concept (**H12**), and personal preference regarding the choice of the measurement system (**H13**). It is important to note that enjoyment, motivation, and self-concept are used to evaluate the student's self-perception after completing the practical training and to investigate possible changes in these constructs due to said practical training to evaluate its possible benefits.

Enjoyment (H8):

The construct enjoyment and the related items were initially described by Budke [55] and Wegner [56] regarding student labs in chemistry and biology classes. The items describing the construct of enjoyment that Budke and Wegner used were adapted and used to evaluate the student's enjoyment before and after the practical training. In the following table, one can see the used items and the original ones used by Budke and Wegner.

Table 6.8.: Items regarding the enjoyment (H8) (changed according to Budke [55] and Wegner [56]).

Original [55]	Items in questionnaire
Conducting experiments is simply fun for me.	Conducting experiments with measurement systems is fun for me. ^a
	I enjoyed the experiments with the measurement systems. ^b
When I am sitting at an experiment, I may not even notice how time flies.	When I experiment, I don't even notice how time flies. ^a
	When I experimented with the measurement systems, I did not even notice how time flies. ^b
Original [56]	
Through the last biology lessons, I am really looking forward to the upcoming lesson.	I am looking forward to working with self-built measuring systems. ^a
	I look forward to experimenting with such measurement systems again. ^b
The biology lessons of the last hours have very enthusiastic.	I am enthusiastic about working with self-built measurement systems. ^a
	I was very enthusiastic about working with the measuring systems. ^b
In the last lessons of the biology subject, I felt happy and satisfied.	Experimenting makes me feel happy and satisfied. ^a
	Experimenting with the measurement system, I felt happy and satisfied. ^b

^a Item included in pretest; ^b Item included in posttest

Current motivation (H9):

The construct of current motivation evaluates the student's motivation regarding practical training. The items were initially described and analyzed by Rheinberg, Vollmeyer, and Burns [57] and were adapted accordingly to investigate the student's motivation before and after the participation in the practical training. The original construct consisted of 18 items, ten used and adapted. The construct can be subdivided into four categories. The first category, interest, consists of four items. The second one, probability of success, includes one item, the third category, fear of failure, includes two items, and the fourth and last category is tested with three items. In table 6.9, one can see the items used in the questionnaire and the original ones from Rheinberg, Vollmeyer, and Burns [57].

Table 6.9.: Items regarding the current motivation (H9) (changed according to Rheinberg, Vollmeyer and Burns [57]).

Original [57]	Items in questionnaire
Interest	
I like such riddles and puzzles.	I like experiments with puzzles and brainteasers. ^a
	I like working with such self-made measuring systems. ^b
In the task, I like the role of the scientist who discovers connections.	When experimenting, I like the role of the scientist who discovers connections. ^a
	When working with the measurement system(s), I like the role of the scientist who discovers correlations. ^b
After reading the instruction, the task seems very interesting to me.	After listening to the first introductory lecture, the tasks seemed very interesting to me.
With tasks like this, I do not need a reward, I enjoy them as much as I do.	I do not need a reward for experimental tasks. They are so much fun for me as well. ^a
	With tasks like this, I do not need a reward. I enjoy them as much as I do. ^b
Probability of success	
I think anyone can do that.	I believe I am up to the difficulty of the tasks ahead. ^a
	I think the tasks set can be done by anyone. ^b
Fear of failure	
When I think about the task, I am a little worried.	When I think about the tasks, I am a little worried.
The specific performance requirements here paralyze me.	The concrete performance requirements paralyze me. ^a
	The specific performance requirements paralyzed me. ^b
Challenge	
The task is a real challenge for me.	The tasks are a real challenge for me. ^a
	The tasks were a real challenge for me. ^b
I am determined to make a full effort in this task.	I am determined to make a great effort in this task. ^a
	I put a lot of effort into the tasks. ^b
If I manage the task, I will already be a little proud of my prowess.	If I manage the task, I will already be a little proud of my prowess. ^a
	The successful completion of tasks made me proud. ^b

^a Item included in pretest; ^b Item included in posttest

Private interest (H10):

In order to investigate the extent to which the students developed a personal interest in the topic and, in addition, to ascertain any correlations with personal interest, this category was included in the questionnaire with one item. The item belonging to this hypothesis was initially designed for the questionnaire and can be found in the following table.

Table 6.10.: Item of the topic private interest (H10).

Original	Items in questionnaire
-	In my spare time, I will continue to study the topics that deal with the measurement system(s).

Understanding (H11):

The items connected to the student's perceived understanding of the device's operating principle are investigated. Only the understanding perceived by the students is investigated, and not the proper understanding of the underlying phenomena. To investigate this would have required a knowledge test that would have gone far beyond the scope of this study. Five items, one inverted, are used to examine the student's understanding.

Table 6.11.: Items of the construct understanding (H11).

Original	Items in questionnaire
-	Working with the measurement system only confused me. [inverted item]
-	Since working with the measuring system, I have a clear understanding of the subject.
-	I could easily explain the operating principle of the measuring system to a third person.
-	The measurement system(s) helped me a lot to understand the underlying physical phenomena.
-	The structure of the measuring system(s) helped me to understand the operating principle of the measuring system(s).

Self-concept (H12):

Academic science-related self-concept is assessed in this study using the adapted items from Budkes work [55]. In his work, the items have already been used for the chemical student laboratory GreenLab_OS of the University of Osnabrück. The items originate in the hierarchical self-concept model of Shavelson, Hubner, and Stanton [58] and were fundamentally formulated with the study of the Max-Planck-Institute for Human Development in Berlin [59]. For this work, the items from Budke's survey have been adapted from the chemical context to a more general scientific one to match the topics of the practical training better. The original items, as well as the adapted ones, can be found in the following table.

Table 6.12.: Items of the construct self-concept (H12) (changed according to Budke [55]).

Original [55]	Items in questionnaire
Learning chemistry topics is easy for me.	The development of scientific topics is easy for me. ^a
	The development of the practical training's topics was easy for me. ^b
No one can do everything. I simply have no aptitude for chemistry.	No one can do everything. I simply have no aptitude for scientific topics. [inverted item] ^a
	No one can do everything. I simply have no aptitude for such topics in the practical training. [inverted item] ^b
With some chemical contents, I know from the beginning: "I will never understand that".	With some scientific content, I know from the start: "I will never understand that". [inverted item]
I just do not have a knack for conducting chemical experiments.	I just do not have a knack for conducting science experiments. [inverted item]
I have a lot of confidence in chemistry.	I have much confidence in myself regarding scientific experiments. ^a
	I have much confidence in my handling of the measuring system. ^b
With the help of illustrative experiments, I understand even complex correlations.	Through science experiments, I better understand the underlying correlations. ^a
	By experimenting with the measurement system, I better understand the underlying correlations. ^b

^a Item included in pretest; ^b Item included in posttest

Personal preference (H13):

Again, in contrast to the prior items, the personal preference in the choice of measurement system could be answered by choosing between two options instead of a six-point Likert scale. The item can be found in the following table, including its corresponding possible answers.

Table 6.13.: Item regarding the personal preference of the measurement system (H13).

Original	Items in questionnaire
-	I prefer working with self-made measurement systems to working with commercial versions.
-	Possible answers: <input type="radio"/> Yes <input type="radio"/> No

6.2.2. Results and Discussion

First, the data collected will be presented, and the constructs associated with the hypotheses will be introduced. Due to the small sample size, the data are considered collectively and are not broken down by specific sub-variables (e.g., gender or location).

The statistical analysis of the data obtained by the questionnaire was performed with the open-source programming language R from the R Foundation [60]. The significance level of $\alpha = 0.05$ was set for both Cronbach's α , and the Spearman-Brown coefficient [61]. The data collected discuss the hypotheses gathered from the interview study (see section 6.1.4). The evaluation of the practical training and the Maker measurement system, the confidence in the measurement system, the personal experience with the system, the understanding of the underlying physical phenomena, the self-confidence in using Maker measurement systems, and the personal preference in choosing the measurement system for future practical training are investigated.

First, it is checked whether the scale reliabilities are given and whether the items can be combined according to the constructs. Reliability indicates the degree of measurement accuracy for an instrument. The range of values extends from 0 (=measured value consists only of measurement errors) to 1 (=measured value consists only the actual value) [62]. The calculation of the internal consistency is usually done with the alpha coefficient (provided that the construct has at least three items)[61, 62]. Since some constructs consist of only two items, the internal consistency of these was calculated using the Spearman-Brown coefficient [62]. A matrix for the intercorrelation of the individual constructs is used to check the construct validity and eventual dependencies between the constructs. It is important to note that eventual correlations do not necessarily imply causality. The Anderson-Darling test was performed, which resulted in the data not being normally distributed [63]. Since the data is not normally distributed, the Wilcoxon test with continuity correction is performed to analyze the presented constructs [64]. The effect sizes of the Wilcoxon test were calculated using the r value according to *Rosenthal and Rubin* [65].

Reliability analysis was conducted for the constructs "Task design", "Time management", "Setup", "Handling", "Accuracy", "Enjoyment", "Current motivation", "Understanding", and "Self-concept". Table 6.14 lists the reliabilities of the scales, listed separately according to test times. Since not every item could be answered meaningfully for every construct in the pretest, the number of items varies in some for the first and the two further test points. It is also shown in the table.

If all associated items are used for calculating the reliabilities, good to excellent reliabilities are obtained for all constructs, except for the Time management [66]. Due to the insufficient reliability of the item correlation of this construct, the construct is not used for further analysis since the obtained data cannot be trusted. It is noteworthy that a correlation value above 0.9 indicates redundancies within the items [66]. However, since these redundancies do not affect the quality of the constructs, those with a correlation value above 0.9 are also used for further analysis.

The usable constructs (reliability ≥ 0.6) show predominantly strong correlations ($r \geq 0.5$) with each other, which can be seen in table 6.15. It is important to note that the construct Accuracy describes the perceived lack of accuracy that the system exhibits. In order to increase the readability and comprehensibility of the data in table 6.15, the correlation values of the construct Accuracy have been inverted. The data shows that the Task design in the practical training

Table 6.14.: Scale reliabilities, standardized Chronbach's α in case of 3 or more items and Spearman-Brown-coefficient in case of 2 items for both measurement times.

Scale	Number of items ^a	Pretest	Posttest
Task design	4/4	0.89	0.8
Time management	0/2		<u>0.53</u>
Setup	0/2		0.96
Handling	0/2		0.95
Accuracy	0/10 ^b		0.71
Enjoyment	5/5	0.94	0.95
Current motivation	10/10 ^c	0.84	0.89
Understanding	0/5		0.87
Self-concept	6/6	0.88	0.85

^aNumber of items included in the pre- and posttest respectively, ^bComposed of the 3 scales of the judged accuracy of the device, ^cComposed of the 4 scales of the current motivation, underlined: value below the 0.6 reliability threshold

strongly correlates positively with Handling, Enjoyment, Private interest, Understanding, and Self-concept. From this data, it can be concluded that the open-task design in the practical training substantially influences the constructs mentioned above. The construct "Setup" shows solid and significant correlations with all other constructs except the Current motivation. The Handling construct strongly and significantly correlates with the constructs, Task design, Setup, Accuracy, Understanding, and Self-concept. The inverted construct, Accuracy, shows significant and strong correlations with Setup, Handling, Understanding, and Self-concept. Enjoyment correlates strongly and significantly with the constructs Task design, Setup, Current motivation, Private interest, Understanding, and Self-concept. One should note that the correlation between Self-concept and Enjoyment shows the overall strongest internal correlation ($r=0.802$; $p \leq 0.1$), suggesting that a participant who enjoys working with a Maker-based measurement system also has a pronounced self-concept. In contrast to the previous constructs, the Current motivation only correlates strongly and significantly with the two constructs, Enjoyment and Understanding. It suggests that the Current motivation impacts the other constructs the least. The Private interest shows a significant strong positive correlation with Task design, Setup, Understanding, and Self-concept. The construct Understanding is the only one that correlates strongly in a significant way with all the other constructs suggesting that the overall impact of this construct weighed most heavily in the investigation. Based on the correlations between the scales, it can be shown that there is construct validity.

6.2.2.1. Hypothesis testing

In the following, the hypotheses presented in section 6.1.4 regarding the research questions of the interview study will be tested. The aim is to investigate how the participants evaluate the practical training and its design (task types, time management, Etc.), how the work with a Maker measurement system is evaluated, and to what extent the work with this system influences the perception of the participants. First, all hypotheses regarding the practical training (task type, time management, time scope, and location) are described. Next, the hypotheses regarding

Table 6.15.: Correlation matrix of the constructs of the study at the second test time point.

Scale	Task design	Setup	Handling	Accuracy
Setup	0.440 [†]			
Handling	<u>0.500[†]</u>	<u>0.743[†]</u>		
Accuracy [‡]	0.311	<u>0.511[†]</u>	<u>0.644[†]</u>	
Enjoyment	<u>0.630[†]</u>	<u>0.736[†]</u>	0.725	0.529
Current motivation	0.399 [†]	0.434 [†]	0.339 [†]	0.094
Private interest	<u>0.603[†]</u>	<u>0.517[†]</u>	<u>0.526[†]</u>	0.315
Understanding	<u>0.573[†]</u>	<u>0.597[†]</u>	<u>0.752[†]</u>	<u>0.577[†]</u>
Self-concept	<u>0.532[†]</u>	<u>0.722[†]</u>	<u>0.740[†]</u>	<u>0.608[†]</u>
Scale	Enjoyment	Current motivation	Private interest	Understanding
Current motivation	<u>0.658[†]</u>			
Private interest	<u>0.648[†]</u>	0.422 [†]		
Understanding	<u>0.573[†]</u>	<u>0.589[†]</u>	<u>0.566[†]</u>	
Self-concept	<u>0.802[†]</u>	0.473 [†]	<u>0.601[†]</u>	<u>0.798[†]</u>

[†]Correlation significant at the 0.01 level (2-sided), underlined: values that show strong correlation, [‡]The correlation values of this item have been inverted to increase readability and comprehensibility.

Maker measurement systems (setup and handling) are presented. Lastly, the personality variables (trust, personal experience, understanding, confidence, and preference) towards the used system are described. All data are initially presented descriptively. Then, if possible (pretest and posttest available), the data is analyzed using the statistical method of the Wilcoxon test, as already mentioned. The results of these calculations are presented below with the associated hypotheses.

6.2.2.2. Practical training

H1: The students prefer open tasks.

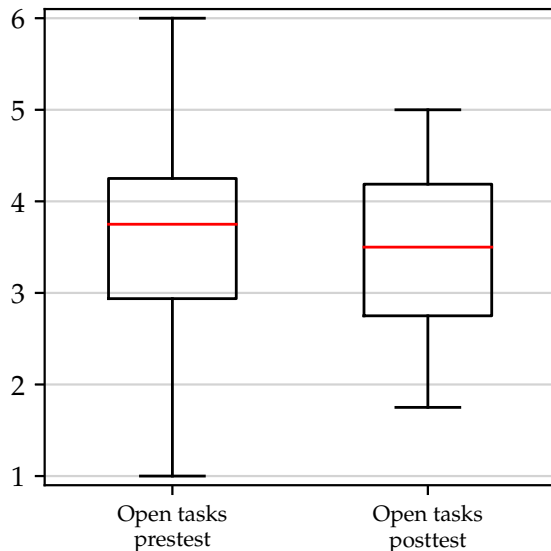


Figure 6.1.: Box plots of the data regarding the task design or the pretest and posttest.

Before working with the Maker based measurement system, the participants in the sample expressed neutrally toward the task design ($M = 3.59$, $SD = 1.37$). After completing the practical training, the preferences regarding the task design are again described neutrally ($M = 3.48$, $SD = 1.22$). These results are also visible in the corresponding box plot of the data, which can be found in Fig. 6.1. A subsequent Wilcoxon test ($V = 485.5$, $p = 0.479$) of the data at both test times shows no significant difference between the data at both test times.

From the data analysis, it can be concluded that, contrary to the hypothesis (**H1**), the participants in the sample do not prefer open tasks but do not prefer closed tasks either. In addition, it can be concluded that participation in the practical training with open tasks has no impact on the students' perception of the task design.

H2: Free time management in the practical training is preferred by students to a strict schedule.

Since the reliability of the scales associated with time management is not sufficiently high, as already described (see table 6.14), no reliable statement can be made in this regard. In order to verify or falsify this hypothesis, new items with a high enough reliability (≥ 0.6) have to be created for a subsequent study.

H3: The time scope of the practical training should correspond to that of conventional ones.

Regarding the time scope, a majority (69.8%) of the participants in the sample prefer a time scope for the practical training to correspond to conventional ones. Based on this, it can be said that the hypothesis (**H3**) can be considered confirmed in this context.

H4: A practical training at the university/college is preferred to a practical training at home.

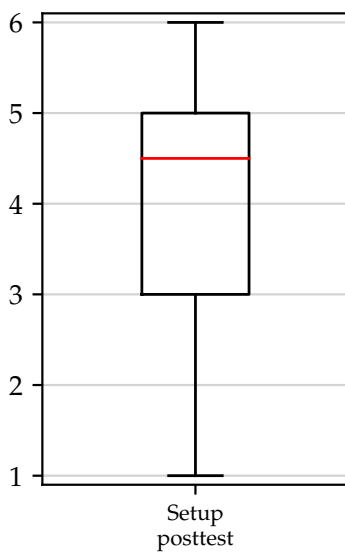
Due to the COVID-19 pandemic, most participants participated in the practical training at home. Nevertheless, according to the hypothesis (**H4**) the preponderance of the participants prefer the university/college (64.3%) as a location for the practical training over their own home (35.7%).

Summary of the practical training

The data suggest that participants do not prefer open tasks to closed tasks or vice versa. This attitude is also independent of participation in the practical training with open tasks. In addition, the data shows that the participants want to save time compared to a conventional practical training. As a locality, the university/college is preferred to working at home.

6.2.2.3. Maker measurement system evaluation

H5: Setting up a Maker measurement system is not a major challenge for users.



Since the participants could not make any statements about the design of the measurement system before they worked with it, questions in this regard were only asked in the posttest. As one can see in the box plot in Fig. 6.2 the participants in this sample describe the system setup as no major challenge ($M = 4.09$, $SD = 1.52$). Looking at the box plot in Fig. 6.2 and the high standard derivation of the data in this sample, one should note that only some participants perceived the set-up as a challenge. In contrast, the set-up was not a challenge for numerous participants but rather an easy task.

Nevertheless, based on the results presented here, it can be concluded that the hypothesis (**H5**) can be assumed to be confirmed.

Figure 6.2.: Box plot of the data regarding the Setup.

H6: Handling a Maker measurement system is not a problem for the users.

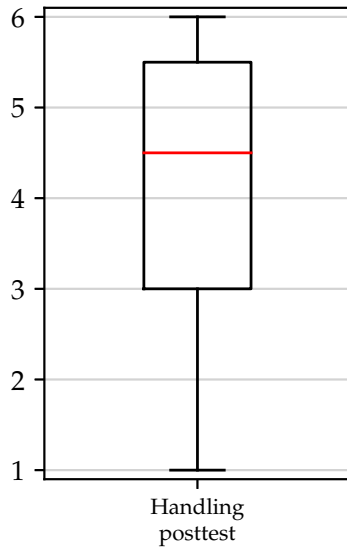


Figure 6.3.: Box plot of the data regarding the Handling.

Just as with the evaluation of the setup, it was only possible to answer the questions relating to handling the measurement system after the intervention. Based on the box plot in Fig. 6.3 it is visible that the system's handling does not present a challenge for the users ($M = 4.17$, $SD = 1.43$). Again, the high standard derivation in combination with the big box in Fig. 6.3 suggests that the rating discrepancy among the participants is definitely to be considered. The discrepancy suggests that some participants might have had some problems handling the system while others found the handling almost trivial.

Considering everything, hypothesis **H6** can still be considered to be confirmed.

Summary of the Maker measurement system evaluation

First and foremost, the data of both hypothesis **H5** and **H6** suggests that the setup and the handling of the used Maker-based measurement system do not present significant challenges to the users. As already mentioned, it is interesting that both categories show the same behavior concerning a high standard derivation. Due to the high positive correlation of these two categories ($r_c = 0.743$ cf. Table 6.15) it can be assumed that participants who find the setup of the system difficult also face difficulties handling it. At the same time, participants who constructed the system with ease also described the handling as easy. Due to the small data set, it is only possible to speculate about the possible reasons for this connection, so further investigations will have to be carried out in a more detailed study.

6.2.2.4. Trust in the measurement system

H7: The Accuracy of the Maker measurement system is judged by users to be limited compared to a commercial alternative.

The trust category consists of three subcategories. The results of the individual subcategories will first be described and interpreted before the hypothesis is discussed.

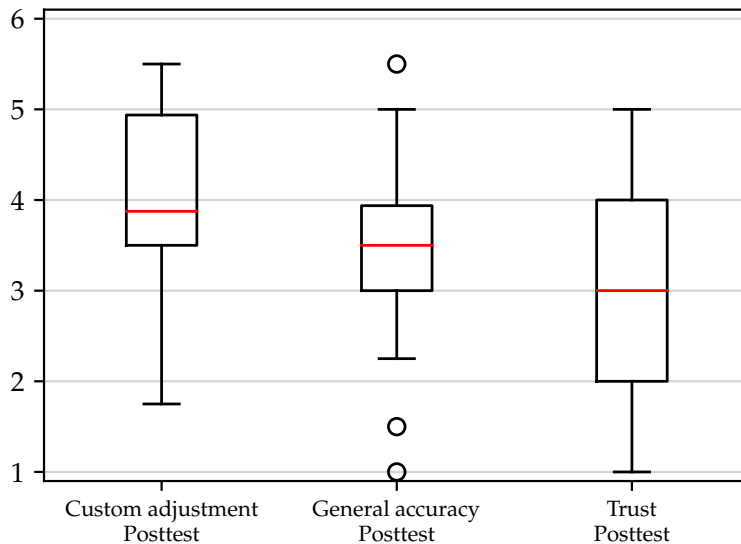


Figure 6.4.: Box plot of the data regarding the Accuracy, including all subcategories.

confirmed by the mean value and the standard deviation resulting from the data ($M = 3.45$, $SD = 0.94$). The third and last subcategory describes the participants' trust in a commercial alternative for the system. The participants' confidence in a commercial alternative tends to be relatively low ($M = 3.09$, $SD = 1.04$). It is further supported by the accompanying box plot of the data in Figure 6.4.

It is particularly noteworthy that the estimated inaccuracy due to the adjustments made by the participants is weighted to the same extent as the lack of confidence in commercial alternatives to the measurement system. This, combined with the neutral evaluation of the general perceived Accuracy, leads to the conclusion that the hypothesis **H7** must be rejected. The Accuracy of the Maker measurement system is not judged by users to be limited compared to a commercial alternative. One reason for this could be that the participants in the practical training were sensitized to the topic of Accuracy through the experiments and thus do not tend to evaluate the Accuracy of a system with which they have not yet worked in an overly favorable manner. Whether this is the reason for the participants' evaluation cannot be clarified with absolute certainty at this point.

The first subcategory represented is the custom adjustment, which measures the perceived limitations of the system due to the adjustments performed by the participants. The data suggests that the participants perceive their adjustment as a limiting factor of the system ($M = 4.08$, $SD = 0.91$). This suggestion is enhanced by the corresponding box plot in Fig. 6.4, which shows a very dominant 75% percentile. The second subcategory describes the perceived general Accuracy of the system. As shown in Fig. 6.4 the participants express neutral towards the Accuracy. This impression is further con-

6.2.2.5. Personal experience

H8: Users enjoy working with Maker measurement systems.

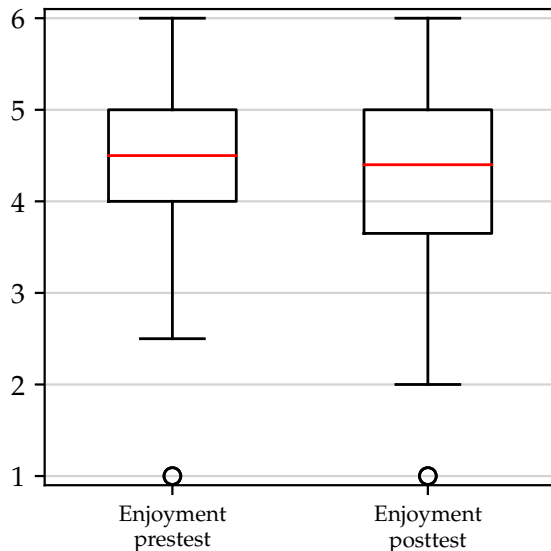


Figure 6.5.: Box plots of the data regarding the Enjoyment for the pretest and posttest.

Before working with the measurement system in the practical training, the participants stated their enjoyment of conducting experiments with measurement systems ($M = 4.33$, $SD = 1.27$). After completing the practical training, the participants again express their enjoyment of working with the measurement system ($M = 4.13$, $SD = 1.41$). The box plot in Fig. 6.5 supports these findings. In the context of personal experience, in this case, fun, it is essential to note that despite the thoroughly positive evaluation in the pretest and posttest, the data at both test times shows an extraordinarily high standard deviation. These results indicate that the enjoyment regarding the work with the measurement system is distributed quite heterogeneously in the group, up to the point where some participants feel little or no fun experimenting. In contrast, others find the enjoyment to be highly pronounced. A subsequent Wilcoxon test ($V = 516$, $p = 0.271$) of the data at both test times

shows no significant difference between the data of both test times, indicating that participation in the practical training does not influence the enjoyment of the participants.

Judging from the results obtained by the gathered data, it can be concluded that hypothesis **H8** can be considered confirmed. In order to investigate eventual changes in the enjoyment experienced by the participants, a subsequent study with more participants ($n \geq 50$) should be performed.

H9: The Maker measurement system motivates users to want to continue working with the measurement system.

The trust category consists of three subcategories. The results of the individual subcategories will first be described and interpreted before the hypothesis is discussed.

The first subcategory included in this category Interest. The Interest covers the students' interest in the measurement system used in the practical training. Both in the pretest ($M = 4.25$, $SD = 1.37$) and the posttest ($M = 4.28$, $SD = 1.38$), the participants in this sample rate the measurement system as enjoyable. A subsequent analysis of both test times using a Wilcoxon test ($V = 388.5$, $p = 0.988$) showed no significant difference in the participants' interest between both test times. The second subcategory covers the fear of failure. The fear of failure is described at both test times as relatively low. The data shows that the participants rate the fear of failure higher in the pretest ($M = 3.29$, $SD = 1.57$) than in the posttest (M

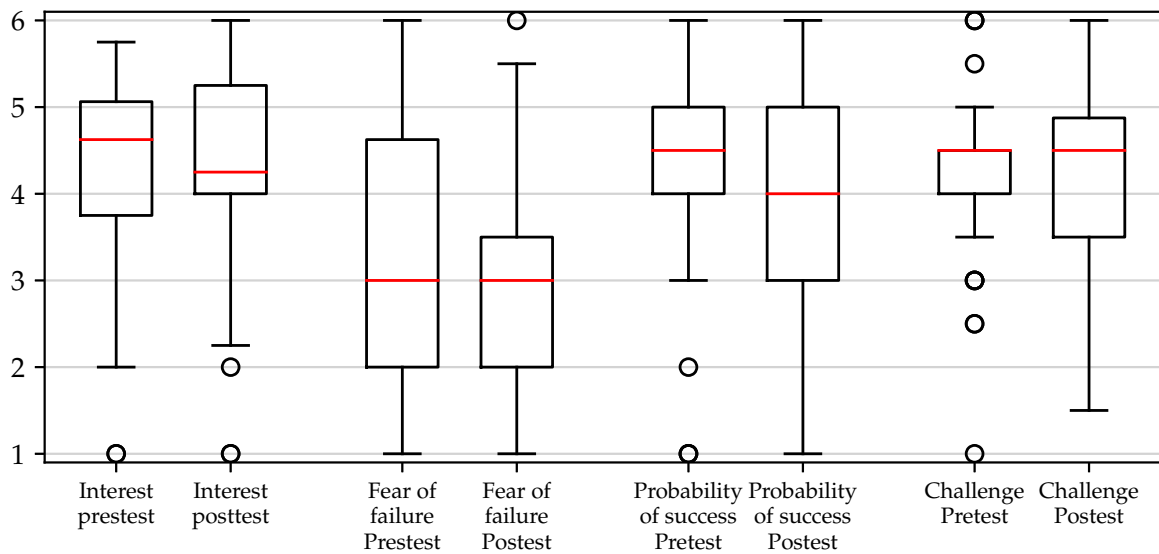


Figure 6.6.: Box plot of the Motivation data, including all pretest and posttest subcategories.

= 2.91, SD = 1.41). Judging from this result, one could assume that the practical training decreased the fear of failure. However, the associated data analysis using a Wilcoxon test ($V = 383$, $p = 0.434$) shows that the difference between both test times is not significant and therefore falsifies the assumption. The third subcategory describes the participants' perceived probability of success. The probability of success is positively described in the pretest ($M = 4.2$, $SD = 1.2$) and posttest ($M = 4.09$, $SD = 1.27$). The following Wilcoxon test ($V = 274.5$, $p = 0.038$) of the data shows a significant difference between the pretest and posttest data. A subsequent effect-strength calculation ($r = -0.325$) shows that the work with the measurement system in the practical training has a small negative effect on the probability of success. One reason could be that the tasks to be worked on in the practical training with the measuring system were too difficult or complex, so the participants' presumption of success was slightly reduced retrospectively. Whether this is the reason for the participants' evaluation cannot be clarified with absolute certainty at this point. The fourth and last subcategory describes the challenge the participants faced while working with the system. The participants describe the challenge in both pretest ($M = 4.2$, $SD = 1.2$) and posttest ($M = 4.09$, $SD = 1.27$) as rather feasible. Again, the subsequent Wilcoxon test ($V = 328.5$, $p = 0.83$) shows that no significant difference can be measured between test times.

It is important to note that all subcategories show strongly pronounced standard derivations, as was the case for the personal experience (see section 6.2.2.5) or the evaluation of the measurement system (see section 6.2.2.3). Again, this is probably due to the heterogeneous composition of the group in combination with the relatively small sample sizes ($n = 41$).

Even though one small negative effect regarding the probability of success working with the measurement system could be measured, all subcategories show a positive attitude of the participants in the sample towards working with the measurement system. Because of this hypothesis, **H9** can be considered confirmed. In a subsequent study with more participants ($n \geq 50$), one

might find significant differences between both test times for all subcategories and therefore be able to perform a more in-depth judgment of hypothesis **H9**.

H10: The users of the Maker measurement system are not interested in a private occupation with the measurement system.

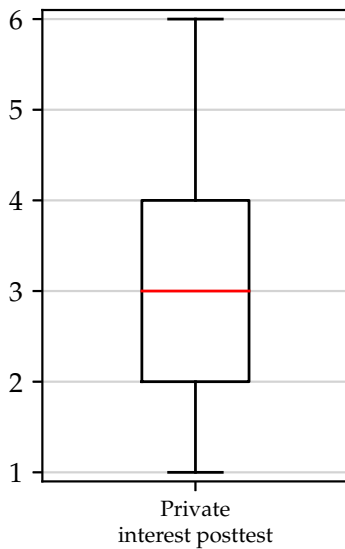


Figure 6.7.: Box plot of the data regarding the Private interest.

Since the category of private interest required the participants to first work with the measurement system, it was only possible to investigate this category in the posttest. The item connected to this category investigated the positive attitude towards working with measurement systems as a private occupation. Based on the data in Fig. 6.7, it is visible that the participants have little to no interest ($M = 2.79$, $SD = 1.5$) in a private occupation with the system.

Judging from the results gathered from this category, it is safe to assume that hypothesis **H10** can be considered as confirmed.

Summary of the Personal experience

First and foremost, the data of both hypothesis **H8** and **H9** suggests that the participants had an overall positive personal experience working with the measurement system. One should note that all subcategories of each hypothesis show a similarly strong expression of the standard derivation, suggesting that participants who experienced less joy experimenting with the system probably also had a lower current motivation. This fact is enhanced by the strong correlation between the enjoyment and the current motivation ($r_c = 0.658$ cf. Table 6.15). Regarding the private interest, it is essential to note that students have no interest in a private occupation with the measurement system, and even though this category shows a strong correlation with enjoyment ($r_c = 0.648$ cf. Table 6.15) and correlation with the current motivation ($r_c = 0.422$ cf. Table 6.15) the participants express a positive personal experience, as mentioned above. This result, which at first glance appears to be a contradiction, can probably be explained by the fact that a mathematical correlation does not necessarily imply causality. To further investigate and clarify this result, a dedicated study is needed, which is outside the scope of this work.

6.2.2.6. Understanding

H11: Working with Maker measurement systems enhances the perceived understanding of the underlying functional principles of the measurement system.

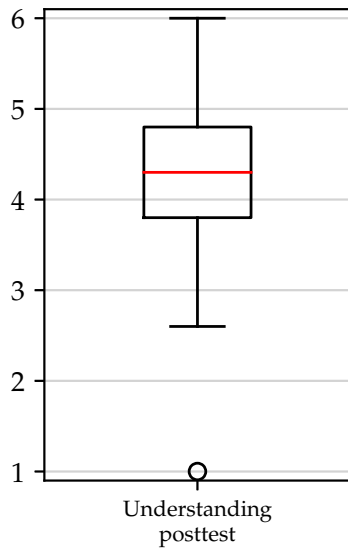


Figure 6.8.: Box plot of the data regarding the Understanding.

The category understanding was only tested in the post-test due to the participants being unable to perform any judgments regarding the perceived understanding before working with it. As it is depicted in Fig. 6.8, the participants describe the perceived understanding of the topic due to working with the system positively. A look at the metadata (average and standard derivation) ($M = 4.24$, $SD = 0.97$) further enhances the impression gained from the box plot.

It is safe to assume that working with the self-built measurement system enhances the perceived understanding of the participants in this sample regarding the covered topics. Judging from this hypothesis, **H11** can be assumed as confirmed.

6.2.2.7. Confidence

H12: Working or experimenting with Maker measurement systems promotes the ability self-concept in the area of working with scientific measurement systems.

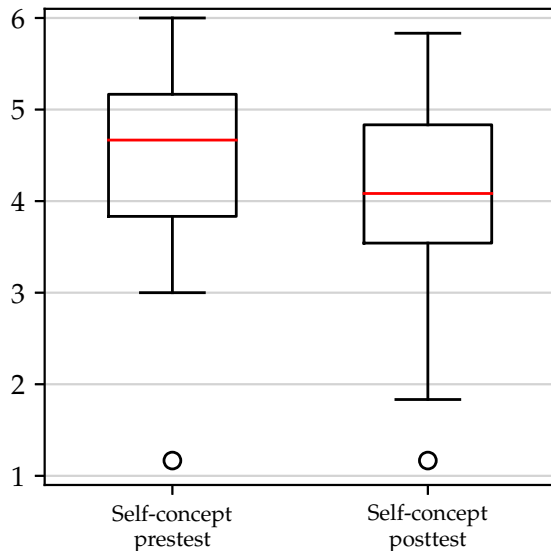


Figure 6.9.: Box plot of the data regarding the Self-concept.

Before participating in the practical training and working with the measurement system, the ability self-concept of the participants was tested ($M = 4.46$, $SD = 1.21$). After taking part in the practical training, the ability self-concept was tested again ($M = 4.09$, $SD = 1.57$). Judging from these data points in combination with the corresponding data depicted in Fig. 6.9, it is clear that the ability self-concept of the participants before and after taking part in the practical training and working with the system can be considered positive.

A closer look at the data and Fig. 6.9 shows that the ability self-concept decreases from the first to the second test time. A Wilcoxon test ($V = 569$, $p = 0.072$) of the data for both test times showed that the difference between the test times misses the significance threshold of $p = 0.05$. Due to that, no significant difference in the ability self-concept could be measured.

Since no significant difference between both test times could be found, hypothesis **H12** needs to be rejected. It is important to note that a bigger sample size might be able to show a significant difference. For this reason, the hypothesis formulation for a follow-up study should be adapted to fit the expected data.

6.2.2.8. Preference

H13: Working or experimenting with a Maker measurement system is preferred to working with, for example, a conventional measurement system.

Regarding the preference in the choice of the measurement system, the majority (65.1%) of the participants prefer to work with a conventional measurement system instead of the self-built one (34.9%). Based on this, it can be said that hypothesis **H13** can be discarded in this context. One reason for this preference could be the increased time needed to construct and adjust the measurement system. Whether this is the reason for the participants' evaluation cannot be clarified with absolute certainty at this point.

6.2.3. Final discussion of the study

A total of 42 students took part in the study to evaluate the practical training and the use of the optocubes system in teaching. The central question was how participants evaluate the practical training format (location and task) and to what extent the optocubes-based measurement system is evaluated in various respects. In addition, it was examined whether working with the system positively or negatively influenced various attitudes of the participants. Therefore, a questionnaire study was evaluated in a pre and post-test design. The general content of the practical training was the same for all participants. The parts and tasks were individually adapted to the participants' respective age and knowledge levels so that any lack of mathematical or physical knowledge did not represent an obstacle. The thematic focus of the practical training was on the setup and adjustment of the C-T spectrometer and the application of transmission and absorption spectroscopy.

Concerning the practical training, contrary to the original assumption, it could be shown that the participants do not prefer any type of task over another. There were also no statistically significant changes in this respect due to participation in the practical training. In addition, it has been shown that a strict time and task schedule is preferred to a flexible organization of time management and task implementation. Finally, the participants stated that they prefer the university as a location for a practical training. In future practical training with optocubes, these aspects should be considered to improve further the acceptance of the practical training by the participants.

The measurement system implemented with optocubes is rated well by the participants concerning the hardware. Neither the setup of the system nor the subsequent handling posed any significant challenge to the users. It is important to note that, despite the excellent rating, the users' opinions show a significant standard deviation in this respect. It can be deduced from this that some participants consider the setup and handling trivial, while others perceive these tasks to be challenging. The strong positive correlation between the two constructs suggests that users who had problems setting up the device also found it challenging to use, and vice versa. It can be assumed at this point that participants with little experience in "tinkering" faced more significant challenges than those experienced in this discipline. For future work with the optocubes system with inexperienced users, it is highly recommendable to offer a separate, detailed introduction to the function and operation of the optocubes system for interested persons. In contrast, it is probably sufficient for experienced "tinkerers" to provide a construction manual without further explanations.

Contrary to the original assumption, the system's accuracy realized with optocubes is not reduced compared to a conventional system. The system's accuracy is assessed as neither particularly good nor bad. Interestingly, the main reason for the system's inaccuracy is its failure. Nevertheless, the measurement data of a conventional measurement system is also not trusted unreservedly by the participants. This critical view of the participants on the accuracy of conventional and self-built systems shows that the users critically question the results produced. For future work with optocubes-based measurement systems in practical training, for example, a more explicit focus should be placed on this topic to promote the critical examination of data from measurement systems. At the same time, any uncertainties concerning the self-adjustment can be dealt with so that the ability self-concept of the participants is promoted more strongly. In order to make reliable statements on this, however, this assumption must be examined more closely in a subsequent study.

The personal experience of the participants can generally be described as optimistic. The users state that they have fun experimenting with measurement systems. This fun also translates to the work with the optocubes system. A significant change in the perceived enjoyment cannot be determined. The current motivation of the participants is also positive, both before and after working with the system. Again, no significant difference can be found between the two test times for the interest, the fear of failure, and the perceived challenge of the tasks. Only the probability of success shows a slight reduction due to working with the optocubes system. Interestingly, the participants expressed no interest in working with the optocubes measurement system in their private environment. It is important to note that all data sets in the upper category of personal feelings of the participants also show relatively large standard deviations. The (strong) correlations between the setup category and the categories covering personal experience (see Table 6.15) suggests that participants who perceived the setup and handling as challenging experienced less fun and had a lower current motivation. This finding suggests that a user-oriented introduction to the optocubes system is essential not only to improve the setup and handling of the system by the users but also to positively influence their personal experience in working with the optocubes system so that the probability of success is not reduced.

The assumption that working with a measurement system based on optocubes improves the perceived understanding of the users could be confirmed. It is essential to mention that the perceived understanding correlates strongly and two-sided significantly with all other categories. From this, it can be concluded that optimized preparation for working with the optocubes system could also positively affect the users' perceived understanding. Therefore, using the optocubes system in an educational setting offers immense added value, at least for realizing measurement systems themselves. Finally, it remains to be clarified in a further study whether, in addition to improving the perceived understanding, the true understanding also increases.

The participants' ability self-concept can be described as positive before participating in the practical training. After participating and working with the optocubes system, the participants describe their ability self-concept as positive. Once again, there was no statistically significant change between the two test points. Concerning this category, it should also be mentioned that the data shows high standard deviations. The self-concept also shows significant two-sided correlations of medium to high strength with all other categories (see Table 6.15). This again suggests that users who have found working with the system more challenging also rate their ability self-concept lower.

Contrary to the original assumption of hypothesis **H13**, the practical course participants do not prefer using a measuring system based on optocubes but would like to work with a conventional system. For future practical training in measurement systems, the use of an optocubes-based measurement system should nevertheless be considered, despite the preference expressed by the participants in this study. The consistently positive evaluation of the system, in combination with an appropriate pre-tutorial, can provide an immense didactic advantage in an educational environment over the use of a conventional system.

It can be concluded that the practical training and, above all, the optocubes-based measurement system were evaluated positively across the board. For this reason, using the optocubes system in an educational context is worthwhile, even though no significant changes in the users' attitudes could be detected due to working with the system. The possibilities and flexibility resulting from using the optocubes system make it valuable in education.

7. Conclusion

In the following, the most important results of this thesis will be compiled and critically examined. In addition to a general overview, the individual formats and the associated study will be discussed separately.

In this thesis, an Open Hardware approach in combination with different Maker tools is used to address and resolve the existing tension between natural science mediation formats and the corresponding hardware. Based on the topic of optical spectroscopy, mediation formats for different target groups are developed using the Open Hardware approach. In this context, the mutual dependencies of the format and the hardware are eliminated and transformed into adaptive mutual support. For this purpose, an Open Hardware-based DIY high-end spectrometer is designed using low-cost professional optics (sourced from Thorlabs [67]) and detectors (sourced from Eureka [68]), as well as maker tools, e.g., LEGO-Bricks[®] and the Optocubes framework [45]. The focus when selecting the professional components used is not only placed on price but also availability. Consequently, these components can be easily purchased by different target groups. The basic mechanical construction of the spectrometer is based on modular systems such as LEGO[®] or the Optocubes framework. The use of these modular systems offers several advantages. These components make it possible to create a modular spectrometer that can be adapted quickly and flexibly to different applications (e.g., absorption spectroscopy, fluorescence spectroscopy, or reflection spectroscopy) and settings. Furthermore, the spectrometer can be easily disassembled into its parts, and the components can be used for further projects.

Since the design of the spectrometer is based on modularity, the spectrometer has to be manually adjusted and then calibrated before being used, e.g., the alignment of optical components, the beam path, and subsequent wavelength calibration. The time required for the adjustment is strongly dependent on the individual user's level of knowledge and experience. The first initial adjustment requires the most time, while repeated adjustments at later times are usually faster. After the spectrometer has been adjusted, it usually remains adjusted so that it can be used without further effort after a single adjustment. However, the spectrometer may have to be readjusted when a module has been replaced. The necessity of adjusting the spectrometer is also one of its greatest strengths. Thanks to the adjustment option, the spectral range of the spectrometer can be modified as desired, e.g., changing a spectral range of 350 - 750 nm to 500 - 800 nm, within the scope of the possibilities of the hardware used, without having to replace the hardware (e.g., the grating).

Application in teaching natural sciences

In order to make the subject of high-end DIY spectroscopy and the associated hardware accessible to the field of science education, two peer-reviewed papers were published in established journals.

For the construction of the high-end DIY spectrometer described in the paper, LEGO[®]-bricks

are used for the basic mechanical construction. The use of LEGO[®]-bricks makes it possible to teach the subject of spectroscopy with the highest degree of flexibility. On the one hand, the students can be involved in the construction process of the spectrometer, which not only provides immense educational value [69–72] but also lowers the later inhibition threshold of the students to experiment independently with the system [30]. On the other hand, the spectrometer can also be used in the classroom already assembled and, if necessary, opened up to illustrate the underlying principle of operation.

Due to the comparability of, e.g., the spectral resolution of the spectrometer with laboratory equipment (FWHM approx. 1 nm [41, 73]) and the use of LEGO[®]-bricks, the spectrometer designed for science education has a relatively large form factor (45 cm × 38.5 cm × 13.5 cm) compared to commercial alternatives [73]. This large form factor, in combination with the LEGO[®]-bricks used, means that the spectrometer with its 3587 g is comparatively heavy. This high weight can lead to problems, primarily when used in classrooms with younger students, resulting, for example, in reduced mobility and, thus, reduced flexibility of the spectrometer during operation. To avoid this problem, the form factor of the spectrometer can be easily reduced by varying the components at the expense of the spectral resolution, guaranteeing the mobility of the spectrometer for younger students.

One factor to be considered in the context of this spectrometer, especially for use in schools, is the acquisition cost with a purchase price of approx. €500, the spectrometer is significantly cheaper than comparable commercial alternatives, usually available at a price of approx. €2000 up to several tens of thousands euros [73–77]. The high-end DIY spectrometer is an excellent alternative to commercially available spectrometers, especially if one has a limited budget. However, it is also important to consider that a purchase price of €500 can be already too high for many schools. In these cases, the spectrometer can be adapted, e.g., by substituting the housing with a conventional paper box. This substitution reduces the purchase price of the spectrometer at the expense of structural integrity. It should be noted that the purchase price of the high-end DIY spectrometer cannot be reduced further without reducing system specification at the same time.

Within the corresponding paper, it could be shown that the presented flexible design can perform different experiments with curricular relevance in school with outstanding precision. These include taking atomic spectra using a mercury vapor lamp, measuring the characteristic absorption spectrum of KMnO₄, measuring a fluorescence spectrum (Uranine), and measuring the reflectance spectrum of colored LEGO[®] bricks. In conclusion, the high-end DIY spectrometer is ideally suited for experimentally addressing all application areas of optical spectroscopy in schools.

Application for Makers

To make high-end spectroscopy accessible to the group of Makers, the LEGO[®]-brick-based spectrometer is also chosen. LEGO[®]-bricks were chosen, as they are a fixed component of the Maker tools, and interested Makers can use existing materials they possess. In addition, the book’s format is based on the ”1,000 Laser-Hacks für Maker” book series, which has been established in the Maker scene for years, providing Makers who have already worked with books in this series with a straightforward introduction to the topic.

Additionally, to the sources of supply of the individual components and the corresponding

assembly instructions, the book is equipped with various explanations and info boxes, compensating for the substantial heterogeneity in the field of physics and spectroscopic expertise in the Maker movement. The book thus enables as many Makers as possible to realize the DIY high-end spectrometer. However, the book's level of detail, provided by instructions and info boxes, can also be a problem. Despite the extensive info boxes, the topic requires a minimum basic understanding of physics. If this requirement is not met, it is possible that the book cannot be successfully worked through, even with extensive explanations. It, in turn, can lead to frustration and an incorrect assessment of the entire subject.

In addition to the extensive explanations, the book's third chapter offers ideas and suggestions for alternative components of the spectrometer, e.g., an optical fiber coupler as a slit replacement, and system specifications to optimize exchanging the CD-based reflective diffraction grating for a blazed diffraction grating. These chapters are of particular value to the Maker, who already has extensive knowledge in the field of spectroscopy. However, it is critical to note that the experimental ideas in the book's third chapter are provided only with minimal explanations if any. This can lead to a situation where a person who has acquired the necessary expertise with the help of the book's first two chapters encounters an increase in demand in the third chapter that cannot be easily mastered. The resulting frustration about experiments that cannot be replicated may also lead to a false assessment of the book.

Due to the heterogeneity of the Maker scene in general and in particular concerning the topic of spectroscopy, it is therefore not possible to design a single book (format) that has the ambition to address as wide a range of the maker scene as possible and at the same time be interesting and useful for all to the same extent. Instead, the aim is to offer added value in the context of DIY high-end spectroscopy to as large a subset of the Maker community as possible. In addition, it is up to further study to determine to what extent Makers can use the book and its contents to develop a high-end spectroscopy project.

Application at home

In order to enable groups of people, such as pupils, students, or private persons without any connection to the Maker movement, to get involved with high-end DIY spectroscopy in an extracurricular educational setting, the format of the online practical training was developed and used in the context of this thesis. It is important to note that this format addresses people with intrinsic motivation, as participation was voluntarily.

Enabling students to work on a topic (high-end spectroscopy) that usually requires access to a laboratory was the main focus of the format. For the implementation of the spectrometer setup and the execution of the experiments, a LEGO[®]-brick-based setup was initially used (first round of the practical training), following the example of the school's and Maker movement's format. Due to the limited time frame of the practical training and the significant time consumption associated with the Lego[®]-brick-based setup, the use of the Optocubes framework [45] for the mechanical construction was chosen for all further instances of the online practical training. With this adaptation, it is possible to focus the practical training more on spectroscopy and spend less time on constructing the mechanical foundation. However, the use of the Optocubes framework itself comes with its own problem. In contrast to the construction concept of LEGO[®]-bricks, which is familiar to most people, in utilizing Optocubes, a concept is used which still has to be learned by the participants, resulting in a slightly increased time required at the beginning

of each practical training. Since learning the connection technique usually takes about 10 – 20 minutes, the Optocubes framework, with a total construction time of about 2 hours, still offers a massive advantage over the LEGO[®]-brick-based setup with a construction time of up to 7 hours (from ground up). Furthermore, it remains to be investigated in a future study to what extent the work with the Optocubes framework provides the same pedagogical added value as the work with LEGO[®]-bricks [69–72].

The necessary materials for the practical training were sent to the participants by mail. Apart from a computer, they did not need any other materials. It should be critically emphasized that the implementation of such practical training is associated with high costs (approx. €600 per person) for the materials (despite the use of low-cost materials) and for the shipping. This results in a format (especially for the case of spectroscopy) that can be carried out mainly by institutions with sufficient financial funding. Reducing costs with the same number of participants is only possible if participants can work together on a single system. Although this seems possible in general, external circumstances such as the COVID-19 pandemic [24] or a considerable distance between the participants can disable all opportunities to work cooperatively on one system. At this point, however, one of the greatest strengths of online practical training is revealed: the location of the participants is independent of the organizer’s location, so online practical training beyond national borders is also conceivable.

Another problem that should be addressed in online practical training is material wear. This wear mainly affects the sensitive optical and electronic components, which can easily break during online practical training if handled carelessly. Modular systems such as LEGO[®] or the Optocubes framework are usually sufficiently rigid. In order to reduce costs for replacement components and to teach the handling of laboratory equipment beyond the topic of high-end spectroscopy, it is therefore essential to explicitly point out rules of conduct for handling the components in question. It should be noted that, despite all precautions and explanations, a certain amount of wear/loss of components can always be expected, increasing the general costs of conducting online practical training.

The materials provided to the participants for the online practical training were adapted to their level of knowledge allowing them to solve the tasks based on their prior knowledge. This adaptation can be problematic if groups of participants have a more significant internal heterogeneity. This is seldom the case with university events but rather with voluntary offers, e.g., for interested pupils and individuals. In such cases, the implementation of the course requires a certain degree of differentiation within each group in order to do justice to all participants.

Apart from the cost and wear and tear associated with online practical training in DIY high-end spectroscopy, it is an excellent way to conduct spectroscopic experiments or research over great distances with a diverse target group without needing access to a research lab or FabLab.

Application at the University

In university education, a novel practical training on high-end DIY spectroscopy was also carried out to make the topic accessible to the last target group, students. The basis for the mechanical structure of the spectrometer is the Optocubes framework, just as in the online practical training.

For use in this format, the Optocubes framework offers several advantages. Firstly, there is no need for a separate optical breadboard on which the experiments are carried out since the bread-

board can be realized using the Optocubes framework. This, in turn, means that the practical training does not have to be carried out in laboratories, making it ideal alternative for departments with limited access to optical laboratories. Furthermore, the framework uses mounting techniques and optomechanical components usually used in optical laboratories already preparing the participants for the work in the laboratory during the practical training. Constructing the breadboard and the housing requires a certain amount of time, which must be taken into account. In practical training courses with extraordinarily tight time frames, significant aspects and tasks of the practical training course cannot be worked on due to time constraints.

The knowledge basis for the practical training is mediated in an accompanying lecture specially tailored to the subject, which is then used to carry out the practical training. The concept provides for problem-oriented tasks, which in turn prepare the participants ideally for research work in the laboratory. This is mainly due to the fact that the participants have to plan, carry out and evaluate experiments themselves, which is different from conventional practical training with a predefined script and clear experiment instructions. The educational value of this format is not to be neglected, but also leads to problems. The biggest problem is the required time, which can be significantly increased compared to conventional practical training. Due to the experiments' free planning and creative execution, the participants sometimes need significantly more time than they would have needed in conventional practical training. In addition to the participants' frustration caused by the time-consuming practical training, there is also the possibility of participants not achieving satisfactory results. This can cause frustration and possibly reduce the participants interest in research.

This problem can and must be counteracted with the help of a supervisor avoiding the foundations laid in the practical training, for the work and research in a laboratory, to be negatively associated. However, this is also accompanied by more intensive supervision in comparison to regular practical training, associating this type of practical training with more significant effort for both, the participants and the organizers.

Despite the greater time commitment for participants and supervisors, this novel practical training format enables participants to learn about high-end spectroscopy in all its details using a DIY system and lays a solid foundation for scientific work in a laboratory.

User Studies

The studies evaluated not only the practical training formats but also the impact of the DIY high-end spectrometers on the practical training participants. In this context, the first iteration of the practical training already showed that the main criticism of the LEGO[®]-brick-based spectrometer is the construction time caused by the LEGO[®]-bricks. To address this criticism and reduce the enormous preparation time associated with the LEGO[®]-bricks, the highly sophisticated Optocubes framework [45] was chosen for all further iterations of the practical training, whether at home or at the university.

With regard to the practical training, be it online or at the university, it is evident that participants tend to prefer conventional practical training, both in terms of the task format, the location, and scope of the practical training. Possible reasons for this could be, on the one hand, the comparatively shorter time required for conventional practical training or the preference for the already familiar format over the relatively unknown and new format. However, to get to the bottom of the exact reasons for the preferences expressed by the participants, a specific

follow-up study is needed to investigate this issue in more detail. In the context of the practical training, future iterations should, therefore, critically assess the extent to which the pedagogical benefits of open-ended or problem-oriented tasks [25] and, for example, working with systems such as LEGO[®] [69–72] are preferable to the personal preferences of the participants. This decision must be made on a case-by-case basis and adapted to the individual conditions.

The setup and handling of the DIY high-end spectrometers are relatively easy for the practical training participants. However, the data suggests the individual differences in the group of participants are sometimes relatively significant. In order to counteract the resulting heterogeneity of the participants in the internship, more differentiated setup and adjustment instructions should be used, making the setup and handling of the system as easy as possible for all participants.

The practical training participants showed skepticism regarding the accuracy of the DIY high-end spectrometer. The skepticism relates to the settings and the accuracy of the entire system in general. In addition, the participants also expressed skepticism about the accuracy of a comparable commercially available spectrometer. It is important to note that the participants only based their skepticism on their personal feelings rather than on more detailed and comparable data. In this context, it remains to be investigated in a follow-up study to what extent measurement data influences the participants' assessment and to what extent working with the DIY high-end spectrometer influences the general critical discussion about the accuracy of spectrometers or measurement systems in general.

The personal impressions of the participants about the DIY high-end spectrometer are consistently positive both before and after the practical training. Both fun and motivation are at approximately the same level before and after the practical training. Differences in fun or motivation before or after the practical training are small or insignificant. With the help of a larger sample, it might be possible to determine significant changes in this respect in follow-up studies. It should be noted that the data again show large standard deviations. The positive personal perceptions regarding the DIY high-end spectrometer suggest that it is generally very well suited for practical training. In order to reach also those participants who felt less joy and motivation, materials and explanations with more substantial internal differentiation could be helpful. Beyond the generally positive feelings about the spectrometer, the participants did not express any increased desire to work with the DIY high-end spectrometer in a private environment. It suggests that the spectrometer cannot transfer the participants' "professional interest" in the topic into the private sphere.

The ability-self-concept concerning the realized spectrometer is high before and after the practical training. Differences in the data are not significant in this regard. Furthermore, the participants describe the perceived understanding of the topic of spectroscopy very positively. From these two findings, it can be concluded that the realization and work with the DIY high-end spectrometer enabled the participants to better understand the topic. At this point, it remains to be investigated in a further study to what extent the perceived and the proper understanding correspond with each other and to what extent this affects the ability-self-concept of the participants.

With regard to the spectrometer used, the participants state that they would prefer to work with commercially available spectrometers in future practical training. Looking at the practical training evaluation, a similar possible reason for the participants' preference emerges. The most likely reason is the time needed for setup and adjustment, which the participants usually try to

reduce as much as possible. Also, regarding this topic, it is up to a critical evaluation in further practical training to what extent the time saved by using commercial alternatives outweighs the pedagogical benefits shown in the study conducted and described in this thesis.

In the scope of this thesis, the existing tension between natural science mediation formats on the topic of optical spectroscopy and the corresponding hardware used could be addressed and largely resolved. With the help of an Open Hardware approach based on Maker tools, a modular DIY high-end spectrometer could be realized, which can be flexibly adapted for different mediation formats and target groups. The Open Hardware approach allows not only for the adaptation of the system specifications of the realized high-end DIY spectrometer to the target group's needs but also to adapt the basic mechanical construction to the respective framework conditions without changing the basic design (a modular C-T spectrometer). Based on the same spectrometer design, mediation formats could be created for school and extracurricular education, as well as for the Maker movement and university education. The approach makes it possible that the individual formats are not subject to any hardware restrictions so that a wide variety of applications, such as transmission, reflection, fluorescence, and atomic spectroscopy, as well as the thematization of the functional principle of the spectrometer, can be addressed on an "open system". In addition, the open hardware approach provides such flexibility that a format does not restrict it. This makes it possible that within one format, for example, in the Maker movement, the fundamental principle of all spectrometer components is addressed at the same time as high-precision applications, such as atomic spectroscopy, without having to purchase/implement several spectrometers.

Although it is possible to address all target groups with individual formats and specific hardware, it should be noted that, due to the complexity of the topic, specific formats and materials must be created for each target group in order to be able to respond to the framework conditions of the target group. It is associated with an effort that should not be underestimated. In addition, it is clear, particularly in the case of practical training, that the internal heterogeneity of the target groups sometimes require more differentiated materials, even within a single group, in order to do justice to all the people this target group. Beyond the effort involved in creating the formats, it can be summarized that the use of an Open Hardware approach offers non-negligible advantages for creating and adapting mediation formats within all target groups and provides a positive experience for the different users, which justifies the effort involved.

In contrast to the modular Open Hardware based spectrometer approach described in this thesis, neither commercially available spectrometers nor DIY spectrometers described in the literature can address multiple target groups and simultaneously be used flexibly in a wide variety of application areas. While commercially available spectrometers can be used in different spectroscopic application areas (e.g., reflection spectroscopy and atomic spectroscopy) depending on their features (e.g., by using an optical fiber), they are by no means suitable for use in a setting in which individual components of the spectrometer have to be examined, replaced, or adjusted. The opposite is true of the DIY spectrometers described in the literature. Due to the DIY aspect, individual components can be examined, and all users can assemble the respective spectrometers. Contrary to the commercial spectrometers described in this thesis, these are generally only suitable for one application and do not have system specifications comparable with laboratory

equipment. Finally, neither commercially available nor DIY spectrometers described in the literature can be flexibly adapted to new format concepts for different target groups, thus forcing hardware-related limitations onto established and novel mediation formats.

It can be concluded that the modular Open Hardware based DIY high-end spectrometer provides immense added value across all target groups. However, due to the high time expenditure associated with the material preparation for every format and target group, it must be decided on a case-by-case basis whether the additional time expenditure of an Open Hardware approach can justify the enormous advantages. If, however, the time consumption of material preparation, e.g., in the field of format development for science education, is not an issue, the use of an Open Hardware based spectrometer is to be preferred in any case, as it allows novel formats to be developed even beyond hardware restrictions and hardware being adapted to every format accordingly.

8. Summary

In this thesis, a modular Open Hardware based DIY high-end spectrometer is used for mediating the subject of optical spectroscopy. For this purpose, different, partly novel formats are used or developed to significantly increase the accessibility of the subject within different target groups with partly fundamentally different needs (school education, the maker movement, extracurricular education, and university education). Subsequently, the newly developed formats' acceptance is evaluated by comparing them to established formats. In addition, the hardware Open Source Hardware in use is also evaluated, mainly focusing on its effect on the user employing two different studies (interview and questionnaire).

In order to make the subject of DIY high-end spectroscopy accessible to the field of education (especially science education), two scientific papers with the titles *A do-it-yourself Czerny–Turner spectrometer: atomic emission, absorption, reflection, and fluorescence spectroscopy in natural sciences* and *Spectrometer build of LEGO[®]-bricks – innovations for classes in modern chemistry* are published in established journals. Within the papers, a modular Open Hardware C-T spectrometer based on LEGO[®]-bricks and professional low-cost optical and electronic components is described in detail and tested regarding its suitability in different application areas of spectroscopy (transmission and absorption spectroscopy, fluorescence spectroscopy and reflection spectroscopy). Both papers have already been published in advance.

In contrast to the field of science education, optical spectroscopy is mediated to individuals associated with the Maker movement using a sophisticated book with the title *Measuring atomic spectra yourself*. The book is part of the series *1.000 laser hacks for Makers* and has been published in advance by the Bombini Verlag. The volume described in this thesis describes the construction, adjustment, and handling of a modular Open Hardware C-T spectrometer employing typical Maker tools. Furthermore, multiple experiments with different difficulties are discussed to appeal to the broadest possible range of Makers with different levels of expertise.

In order to mediate optical spectroscopy in an extracurricular setting to a wide range of people again with different levels of expertise, a recipient-specific novel practical training is developed in this thesis. The practical training is carried out online to enable participation regardless of location. The utilization of a modular Open Hardware based C-T spectrometer (using LEGO[®]-bricks or the optocubes Framework) within the practical training enables the participants to explore and adapt the spectrometer without the need for a sophisticated laboratory or equipment. The practical training is carried out voluntarily at a university with students and in the context of a vacation program at an educational institution with pupils, with all necessary materials being sent to the participants by post.

Building on the novel practical training for extracurricular education, adaptations of practical training are made to use it in university education in the field of physics. The basic idea of using Open Hardware (exclusively using the Optocubes framework for mechanical constructions) in combination with problem-oriented task design used in the extracurricular practical training is also employed here. The modular Open Hardware aspect allows for the ground-up construction

of a fully functional C-T spectrometer outside a dedicated lab. It enables the deployment of the constructed spectrometer in various applications.

The interview study associated with the first round of the online practical training shows that the participants rate the online practical training format positively but prefer the interaction possibilities with each other in practical training in a shared location. The handling and the working experience with the spectrometer are generally described positively, while criticism is only expressed towards the time required to assemble the spectrometer utilizing LEGO[®]-bricks. Based on the findings of the interview study, 13 hypotheses regarding the practical training and the used system are proposed. Furthermore, as a result of the criticism, a more sophisticated system, the optocubes framework, is used for all subsequent practical training to cut the construction time to a possible minimum without neglecting the aspects highlighted in the interview study.

Following the interview, a questionnaire study is conducted based on the 13 proposed hypotheses. The study shows that the participants prefer a practical training at a location like a university to working remotely. Regarding the tasks and materials used in the practical training, classical scripts are preferred over an open-task design. The evaluation of the system hardware shows that the users again rate it positively on average. Furthermore, the data also shows a positive evaluation of the hardware regarding personal factors like motivation, enjoyment, and ability self-concept. In addition to the overall positive evaluation of the DIY high-end spectrometer itself and the associated working experience, it should be noted that the collected data consistently show relatively standard solid deviations. Due to the sample size, no significant changes could be found concerning concepts such as motivation, enjoyment, ability self-concept, Etc., which could be caused by the practical training or the hardware in use, e.g., the DIY high-end spectrometer.

In this thesis, a modular Open Hardware based DIY high-end spectrometer is used for mediating the subject of optical spectroscopy. For this purpose, different, partly novel formats are used or developed to significantly increase the accessibility of the subject within different target groups with partly fundamentally different needs (school education, the maker movement, extracurricular education, and university education). Subsequently, the newly developed formats' acceptance is evaluated by comparing them to established formats. In addition, the hardware Open Source Hardware in use is also evaluated, mainly focusing on its effect on the user employing two different studies (interview and questionnaire). In order to make the subject of DIY high-end spectroscopy accessible to the field of education (especially science education), two scientific papers with the titles *A do-it-yourself Czerny–Turner spectrometer: atomic emission, absorption, reflection, and fluorescence spectroscopy in natural sciences* and *Spectrometer build of LEGO-bricks – innovations for classes in modern chemistry* are published in established journals. Within the papers, a modular Open Hardware C-T spectrometer based on LEGO-bricks and professional low-cost optical and electronic components is described in detail and tested regarding its suitability in different application areas of spectroscopy (transmission and absorption spectroscopy, fluorescence spectroscopy and reflection spectroscopy). Both papers have already been published in advance. In contrast to the field of science education, optical spectroscopy is mediated to individuals associated with the Maker movement using a sophisticated book with the title *Measuring atomic spectra yourself*. The book is part of the series *1.000 laser hacks for Makers* and has been published in advance by the Bombini Verlag. The volume described in this thesis describes the construction, adjustment, and handling of a modular Open Hardware C-T

spectrometer employing typical Maker tools. Furthermore, multiple experiments with different difficulties are discussed to appeal to the broadest possible range of Makers with different levels of expertise. In order to mediate optical spectroscopy in an extracurricular setting to a wide range of people again with different levels of expertise, a recipient-specific novel practical training is developed in this thesis. The practical training is carried out online to enable participation regardless of location. The utilization of a modular Open Hardware based C-T spectrometer (using LEGO-bricks or the optocubes Framework) within the practical training enables the participants to explore and adapt the spectrometer without the need for a sophisticated laboratory or equipment. The practical training is carried out voluntarily at a university with students and in the context of a vacation program at an educational institution with pupils, with all necessary materials being sent to the participants by post. Building on the novel practical training for extracurricular education, adaptations of practical training are made to use it in university education in the field of physics. The basic idea of using Open Hardware (exclusively using the Optocubes framework for mechanical constructions) in combination with problem-oriented task design used in the extracurricular practical training is also employed here. The modular Open Hardware aspect allows for the ground-up construction of a fully functional C-T spectrometer outside a dedicated lab. It enables the deployment of the constructed spectrometer in various applications. The interview study associated with the first round of the online practical training shows that the participants rate the online practical training format positively but prefer the interaction possibilities with each other in practical training in a shared location. The handling and the working experience with the spectrometer are generally described positively, while criticism is only expressed towards the time required to assemble the spectrometer utilizing LEGO-bricks. Based on the findings of the interview study, 13 hypotheses regarding the practical training and the used system are proposed. Furthermore, as a result of the criticism, a more sophisticated system, the optocubes framework, is used for all subsequent practical training to cut the construction time to a possible minimum without neglecting the aspects highlighted in the interview study. Following the interview, a questionnaire study is conducted based on the 13 proposed hypotheses. The study shows that the participants prefer a practical training at a location like a university to working remotely. Regarding the tasks and materials used in the practical training, classical scripts are preferred over an open-task design. The evaluation of the system hardware shows that the users again rate it positively on average. Furthermore, the data also shows a positive evaluation of the hardware regarding personal factors like motivation, enjoyment, and ability self-concept. In addition to the overall positive evaluation of the DIY high-end spectrometer itself and the associated working experience, it should be noted that the collected data consistently show relatively standard solid deviations. Due to the sample size, no significant changes could be found concerning concepts such as motivation, enjoyment, ability self-concept, Etc., which could be caused by the practical training or the hardware in use, e.g., the DIY high-end spectrometer.

Bibliography

- [1] A. Einstein, “Zur Quantentheorie der Strahlung,” *Phys.Z.* **18**, pp. 121–128, 1917.
- [2] G. Gauglitz and D. S. Moore, Eds., *Handbook of Spectroscopy: Second, Enlarged Edition*, Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Apr. 23, 2014, ISBN: 978-3-527-65470-3 978-3-527-32150-6. DOI: 10.1002/9783527654703. (visited on 08/02/2022).
- [3] W. M. Yen and M. D. Levenson, Eds., *Lasers, Spectroscopy and New Ideas: A Tribute to Arthur L. Schawlow*, vol. 54, Springer Series in Optical Sciences, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1987, ISBN: 978-3-662-13608-9 978-3-540-47872-0. DOI: 10.1007/978-3-540-47872-0. (visited on 08/02/2022).
- [4] H.-H. Perkampus, *UV-VIS-Spektroskopie und ihre Anwendungen*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1986, ISBN: 978-3-642-70516-8.
- [5] M. Pokrzywnicka, R. Koncki, and L. Tymecki, “A concept of dual optical detection using three light emitting diodes,” *Talanta* **82**, pp. 422–425, 2010, DOI: 10.1016/j.talanta.2010.04.026.
- [6] D. R. Albert, M. A. Todt, and H. F. Davis, “A Low-Cost Quantitative Absorption Spectrophotometer,” *Journal of Chemical Education* **89**, pp. 1432–1435, 2012, DOI: 10.1021/ed200829d.
- [7] B. T. Wigton, B. S. Chohan, C. McDonald, M. Johnson, D. Schunk, R. Kreuter, and D. Sykes, “A Portable, Low-Cost, LED Fluorimeter for Middle School, High School, and Undergraduate Chemistry Labs,” *Journal of Chemical Education* **88**, pp. 1182–1187, 2011, DOI: 10.1021/ed200090r.
- [8] J. Asheim, E. V. Kvittingen, L. Kvittingen, and R. Verley, “A Simple, Small-Scale Lego Colorimeter with a Light-Emitting Diode (LED) Used as Detector,” *Journal of Chemical Education* **91**, pp. 1037–1039, 2014, DOI: 10.1021/ed400838n.
- [9] A. L. Adams-McNichol, R. C. Shiell, and D. A. Ellis, “Accurate, Photoresistor-Based, Student-Built Photometer and Its Application to the Forensic Analysis of Dyes,” *Journal of Chemical Education* **96**, pp. 1143–1151, 2019, DOI: 10.1021/acs.jchemed.8b00862.
- [10] J. J. Wang, J. R. Rodríguez Núñez, E. J. Maxwell, and W. R. Algar, “Build Your Own Photometer: A Guided-Inquiry Experiment To Introduce Analytical Instrumentation,” *Journal of Chemical Education* **93**, pp. 166–171, 2016, DOI: 10.1021/acs.jchemed.5b00426.
- [11] C. M. Clippard, W. Hughes, B. S. Chohan, and D. G. Sykes, “Construction and Characterization of a Compact, Portable, Low-Cost Colorimeter for the Chemistry Lab,” *Journal of Chemical Education* **93**, pp. 1241–1248, 2016, DOI: 10.1021/acs.jchemed.5b00729.
- [12] K. Knagge and D. Raftery, “Construction and Evaluation of a LEGO Spectrophotometer for Student Use,” *The Chemical Educator* **7**, pp. 371–375, 2002, DOI: 10.1007/s00897020615a.

- [13] E. V. Kvittingen, L. Kvittingen, T. B. Melø, B. J. Sjørnes, and R. Verley, “Demonstrating Basic Properties of Spectroscopy Using a Self-Constructed Combined Fluorimeter and UV-Photometer,” *Journal of Chemical Education* **94**, pp. 1486–1491, 2017, DOI: 10.1021/acs.jchemed.7b00121.
- [14] B. S. Hosker, “Demonstrating Principles of Spectrophotometry by Constructing a Simple, Low-Cost, Functional Spectrophotometer Utilizing the Light Sensor on a Smartphone,” *Journal of Chemical Education* **95**, pp. 178–181, 2018, DOI: 10.1021/acs.jchemed.7b00548.
- [15] J. R. Vanderveen, B. Martin, and K. J. Ooms, “Developing Tools for Undergraduate Spectroscopy: An Inexpensive Visible Light Spectrometer,” *Journal of Chemical Education* **90**, pp. 894–899, 2013, DOI: 10.1021/ed300396x.
- [16] O. Happel, “Ein LED-Selbstbauphotometer für den MINT-Bereich: Grundlagen und Anwendungsbeispiele aus der chemischen bis wirkungsbezogenen Analytik,” *CHEMKON* **27**, pp. 287–294, 2020, DOI: 10.1002/ckon.202000002.
- [17] E. Kehoe and R. L. Penn, “Introducing Colorimetric Analysis with Camera Phones and Digital Cameras: An Activity for High School or General Chemistry,” *Journal of Chemical Education* **90**, pp. 1191–1195, 2013, DOI: 10.1021/ed300567p.
- [18] K. Bougot-Robin, J. Paget, S. C. Atkins, and J. B. Edel, “Optimization and Design of an Absorbance Spectrometer Controlled Using a Raspberry Pi To Improve Analytical Skills,” *Journal of Chemical Education* **93**, pp. 1232–1240, 2016, DOI: 10.1021/acs.jchemed.5b01006.
- [19] H. Yu, Y. Tan, and B. T. Cunningham, “Smartphone Fluorescence Spectroscopy,” *Analytical Chemistry* **86**, pp. 8805–8813, 2014, DOI: 10.1021/ac502080t.
- [20] T. S. Kuntzleman and E. C. Jacobson, “Teaching Beer’s Law and Absorption Spectrophotometry with a Smart Phone: A Substantially Simplified Protocol,” *Journal of Chemical Education* **93**, pp. 1249–1252, 2016, DOI: 10.1021/acs.jchemed.5b00844.
- [21] E. K. Grasse, M. H. Torcasio, and A. W. Smith, “Teaching UV–Vis Spectroscopy with a 3D-Printable Smartphone Spectrophotometer,” *Journal of Chemical Education* **93**, pp. 146–151, 2016, DOI: 10.1021/acs.jchemed.5b00654.
- [22] A. Scheeline, “Teaching, Learning, and Using Spectroscopy with Commercial, Off-the-Shelf Technology,” *Applied Spectroscopy* **64**, 256A–268A, 2010.
- [23] M. Czerny and A. F. Turner, “Über den Astigmatismus bei Spiegelspektrometern,” *Zeitschrift für Physik* **61**, pp. 792–797, 1930, DOI: 10.1007/BF01340206.
- [24] E. O. i. Kampe, A.-S. Lehfeld, S. Buda, U. Buchholz, and W. Haas, “Surveillance of COVID-19 school outbreaks, Germany, March to August 2020,” *Eurosurveillance* **25**, p. 2001645, 2020, DOI: 10.2807/1560-7917.ES.2020.25.38.2001645.
- [25] H. Schmidkunz and H. Lindemann, *Das forschend-entwickelnde Unterrichtsverfahren: Problemlösen im naturwissenschaftlichen Unterricht*, Westarp Wissenschaften, Magdeburg, 2003, ISBN: 978-3-89432-042-3.
- [26] M. Imlau, “myphotonics,” Ultrafast Physics Imlau Research Group, [Online]. Available: <http://www.myphotonics.eu/> (accessed 9/15/2022).

-
- [27] S. Klompmaker, F. Lager, B. Bourdon, and M. Imlau, *Interferometer zum Selberbauen: aufbauen, verstehen, forschen*, Bombini Verlag, Bonn, 2019, ISBN: 978-3-946496-09-0.
- [28] F. Lager, S. Klompmaker, B. Bourdon, and M. Imlau, *Hologramme zum Selbermachen: aufbauen, verstehen, forschen*, Bombini Verlag, Bonn, 2019, ISBN: 978-3-946496-13-7.
- [29] M. Osterheider, R. Böttcher, B. Bourdon, and M. Imlau, *Atomspektren selber messen: aufbauen, verstehen, forschen*, Bombini Verlag, Bonn, 2021, ISBN: 978-3-946496-27-4.
- [30] F. Lager, “Hologramme zum Selbermachen: Von der Maker-Werkstatt bis zum modernen Physikunterricht,” 2020.
- [31] C. Ramsauer and M. Friessnig, “Einfluss der Maker Movement auf die Forschung und Entwicklung,” *Industrial Engineering and Management*, pp. 43–61, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2016, DOI: 10.1007/978-3-658-12097-9_3.
- [32] N. Langreiter and K. Löffler, Eds., *Selber machen: Diskurse und Praktiken des 'Do it yourself'*, Edition Kulturwissenschaft Band 90, Bielefeld: transcript, 2017, 350 pp., ISBN: 978-3-8376-3350-4.
- [33] B. Gröndahl, *Hacker*, Rotbuch Verlag, Hamburg, 2000, ISBN: 978-3-434-53506-5.
- [34] A. Gibb, *Building open source hardware: DIY manufacturing for hackers and makers*, Addison-Wesley, Upper Saddle River, NJ, 2015, ISBN: 978-0-321-90604-5.
- [35] “Hackathon,” [Online]. Available: <https://www.hackathon.com:443/country/germany> (accessed 9/15/2022).
- [36] I. für Geoinformatik, “senseBox,” [Online]. Available: <https://sensebox.de/> (accessed 9/15/2022).
- [37] o. gGmbH, “openSenseMap,” [Online]. Available: <https://opensensemap.org/> (accessed 9/15/2022).
- [38] “re:edu — reengineering education,” reedu.de, [Online]. Available: <https://reedu.de> (accessed 9/15/2022).
- [39] S. Klompmaker, “Konzeptionierung und Realisierung eines zielgruppenübergreifenden Maker-Buchs zur Laser-Interferometrie,” 2019.
- [40] C. Scherres, *Niveauangemessenes Arbeiten in selbstdifferenzierenden Lernumgebungen*, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2013, ISBN: 978-3-658-02083-5.
- [41] M. Osterheider, B. Bourdon, R. Boettcher, M. Beeken, and M. Imlau, “A do-it-yourself Czerny–Turner spectrometer: atomic emission, absorption, reflection and fluorescence spectroscopy in natural sciences,” *Physics Education* **57**, p. 065 012, 2022, DOI: 10.1088/1361-6552/ac8a85.
- [42] M. Osterheider, B. Bourdon, R. Boettcher, M. Imlau, and M. Beeken, “Spektrometer aus LEGO®-Bausteinen – Innovationen für den modernen Chemieunterricht,” *CHEMKON* **29**, pp. 204–208, 2022, DOI: 10.1002/ckon.202100088.
- [43] M. Imlau, “1.000 Laser-Hacks für Maker,” 1.000 Laser-Hacks für Maker Imlau Research Group, [Online]. Available: <https://www.1000laserhacks.uni-osnabrueck.de/startseite.html> (accessed 9/15/2022).

- [44] myphotronics, “Michelson Interferometer Build From LEGO(R) Bricks,” Instructables, [Online]. Available: <https://www.instructables.com/Michelson-Interferometer-build-from-LEGOR-bricks/> (accessed 7/11/2022).
- [45] B. Bourdon, Y. Toschke, M. Osterheider, and M. Imlau, *Modular Construction Framework of the Smart Engineering Platform optocubes*, version ENTWURFSVERSION, 2023. DOI: 10.26249/FK2/WOFNVD. [Online]. Available: <https://doi.org/10.26249/FK2/WOFNVD>.
- [46] H. J. Eichler, H.-D. Kronfeldt, and J. Sahn, *Das neue Physikalische Grundpraktikum*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2016, ISBN: 978-3-662-49022-8 978-3-662-49023-5.
- [47] W. Schenk, F. Kremer, G. Beddies, T. Franke, P. Galvosas, and P. Rieger, *Physikalisches Praktikum*, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2014, ISBN: 978-3-658-00665-5 978-3-658-00666-2.
- [48] W. Walcher, *Praktikum der Physik*, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2004, ISBN: 978-3-519-23038-0 978-3-322-94128-2.
- [49] T. Müller and T. Henning, “Problemorientierte Lernprozesse in der Studieneingangsphase,” *Handbuch Innovative Lehre*, pp. 311–324, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2019, DOI: 10.1007/978-3-658-22797-5_23.
- [50] S. Misoch, *Qualitative Interviews*, De Gruyter Oldenbourg, 2019, ISBN: 978-3-11-054598-2.
- [51] T. Dresing and T. Pehl, *Praxisbuch Interview, Transkription & Analyse: Anleitungen und Regelsysteme für qualitativ Forschende*, Eigenverlag, Marburg, 2018, ISBN: 978-3-8185-0489-2.
- [52] J. Claussen, D. Jankowski, and F. Dawid, *Aufnahmen, Abtippen, Analyse\ren: Wegweiser zur Durchführung von Interview und Transkription*, BoD – Books on Demand, Norderstedt, 2020, ISBN: 978-3-7504-7005-7.
- [53] U. Kuckartz, *Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Computerunterstützung*, 2018, ISBN: 978-3-7799-4683-0.
- [54] D. H. Rost, *Interpretation und Bewertung pädagogisch-psychologischer Studien: eine Einführung*, Klinkhardt, Bad Heilbrunn, 2013, ISBN: 978-3-8252-8518-0.
- [55] M. Budke, “Entwicklung und Evaluation des Projektes GreenLab_OS – Empirische Studie zu Effekten von stationären und mobilen Schülerlaborangeboten,” 2019.
- [56] C. Wegner, A. Dück, and N. Grotjohann, “Emotion und Interesse als Grundlage für nachhaltiges Lernen begabter Schüler? - Eine empirische Studie in der sechsten Jahrgangsstufe von Gymnasien - Emotion and Interest as a Basis For Sustainable Learning of Gifted Children? – An empirical study on sixth graders of German secondary schools,” *Journal für Didaktik der Biowissenschaften* 4, 2013.
- [57] F. Rheinberg, R. Vollmeyer, and B. Burns, “FAM: Ein Fragebogen zur Erfassung aktueller Motivation in Lern- und Leistungssituationen,” *Diagnostica* 47, pp. 57–66, 2001, DOI: 10.1026//0012-1924.47.2.57.
- [58] R. Shavelson, J. Hubner, and G. Stanton, “Self-Concept: Validation of Construct Interpretations,” *Review of Educational Research* 46, pp. 407–441, 1976, DOI: 10.3102/00346543046003407.

- [59] O. Köller, Z. Daniels, K. U. Schnabel, and J. Baumert, “Kurswahlen von Mädchen und Jungen im Fach Mathematik: Zur Rolle von fachspezifischem Selbstkonzept und Interesse,” *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie* **14**, pp. 26–37, 2000, DOI: 10.1024//1010-0652.14.1.26.
- [60] “R: The R Foundation,” The R Project for Statistical Computing, [Online]. Available: <https://www.r-project.org/foundation/> (accessed 9/5/2022).
- [61] R. Eisinga, M. t. Grotenhuis, and B. Pelzer, “The reliability of a two-item scale: Pearson, Cronbach, or Spearman-Brown?” *International Journal of Public Health* **58**, pp. 637–642, 2013, DOI: 10.1007/s00038-012-0416-3.
- [62] D. L. Streiner, “Starting at the Beginning: An Introduction to Coefficient Alpha and Internal Consistency,” *Journal of Personality Assessment* **80**, pp. 99–103, 2003, DOI: 10.1207/S15327752JPA8001_18.
- [63] T. W. Anderson and D. A. Darling, “Asymptotic Theory of Certain ”Goodness of Fit” Criteria Based on Stochastic Processes,” *The Annals of Mathematical Statistics* **23**, pp. 193–212, 1952.
- [64] T. Harris and J. W. Hardin, “Exact Wilcoxon Signed-Rank and Wilcoxon Mann–Whitney Ranksum Tests,” *The Stata Journal* **13**, pp. 337–343, 2013, DOI: 10.1177/1536867X1301300208.
- [65] R. Rosenthal and D. Rubin, “r equivalent: A Simple Effect Size Indicator,” *Psychological methods* **8**, pp. 492–6, 2004, DOI: 10.1037/1082-989X.8.4.492.
- [66] J. Cohen, *Statistical power analysis for the behavioral sciences*, L. Erlbaum Associates, Hillsdale, N.J., 1988, ISBN: 978-0-8058-0283-2.
- [67] Thorlabs, “Thorlabs, Inc. - Your Source for Fiber Optics, Laser Diodes, Optical Instrumentation and Polarization Measurement & Control,” [Online]. Available: <https://www.thorlabs.com/> (accessed 7/11/2022).
- [68] “Eureca®,” [Online]. Available: <https://www.eureca.de/> (accessed 7/27/2022).
- [69] D. Kato, K. Hattori, S. Iwai, and M. Morita, “Effects of Collaborative Expression Using Lego® Blocks, on Social Skills and Trust,” *Social Behavior and Personality: an international journal* **40**, pp. 1195–1199, 2012, DOI: 10.2224/sbp.2012.40.7.1195.
- [70] M. J. Brosnan, “Spatial Ability in Children’s Play with Lego Blocks,” *Perceptual and Motor Skills* **87**, pp. 19–28, 1998, DOI: 10.2466/pms.1998.87.1.19.
- [71] J. M. Froiland and M. L. Davison, “Social perception: relationships with general intelligence, working memory, processing speed, visual-spatial ability, and verbal comprehension,” *Educational Psychology* **40**, pp. 750–766, 2020, DOI: 10.1080/01443410.2020.1732873.
- [72] D. B. LeGoff, “Use of LEGO© as a Therapeutic Medium for Improving Social Competence,” *Journal of Autism and Developmental Disorders* **34**, pp. 557–571, 2004, DOI: 10.1007/s10803-004-2550-0.
- [73] “QE Pro Spectrometer — Ocean Insight,” Ocean Insight, [Online]. Available: <https://www.oceaninsight.com/products/spectrometers/high-sensitivity/qepro-series/> (accessed 8/8/2022).

- [74] “Kompakt-Spektrometer,” LEYBOLD, [Online]. Available: <https://www.leybold-shop.de/467252.html> (accessed 10/13/2022).
- [75] “Kompakt - Spektrometer,” PHYWE excellence in science, [Online]. Available: https://www.phywe.de/geraete-zubehoer/optische-komponenten-systeme/kompakt-spektrometer_3122_4053/ (accessed 10/13/2022).
- [76] “Spektrometer Pro LED,” PHYWE excellence in science, [Online]. Available: https://www.phywe.de/geraete-zubehoer/optische-komponenten-systeme/spektrometer-pro-led_3142_4073/ (accessed 10/13/2022).
- [77] “Vernier Spektrometer V-SPEC,” Dynatech, [Online]. Available: <https://www.dynatech.de/vernier-spektrometer.html> (accessed 10/13/2022).

A. Publications

A.1. Peer-Reviewed Paper

- M. Osterheider, B. Bourdon, R. Boettcher, M. Imlau, M. Beeken, *Spectrometer build of LEGO®-bricks – innovations for classes in modern chemistry* CHEMKON, 204-208 (2022), doi: 10.1002/ckon.202100088.
- M. Osterheider, B. Bourdon, R. Boettcher, M. Beeken, M. Imlau, *A do-it-yourself Czerny–Turner spectrometer: atomic emission, absorption, reflection and fluorescence spectroscopy in natural sciences* Phys. Educ. 57 (2022) 065012, doi: 10.1088/1361-6552/ac8a85

A.2. Further Paper

- B. Bourdon, Y. Toschke, M. Osterheider, M. Imlau, *Optocubes Mechanical Construction Framework: A Smart Engineering Platform* to be published

A.3. Conference contributions

- M. Osterheider, M. Beeken, R. Böttcher, B. Bourdon, M. Imlau, *Das LEGO®-Spektrometer Ein innovatives Spektrometer für den Schulalltag*, MNU-Tagung 2020, Germany
- M. Osterheider, *Open Hardware-Spektrometer – Messgeräte im Eigenbau*, Bildungstagung Junior Uni 2021, Wuppertal, Germany
- M. Osterheider, B. Bourdon, R. Boettcher, M. Imlau, M. Beeken, *Spectrometer build of LEGO®-bricks – innovations for classes in modern chemistry*, DiCE meets FGCU 2021, Germany
- M. Osterheider, K. Sengebusch, J. Beckers, M. Imlau, *High performance, low-cost USB line scanning sensor board for industrial and research applications*, ODF 2022, Sapporo, Japan

A.4. Books

- M. Osterheider, B. Bourdon, R. Boettcher, M. Imlau, M. Beeken, *Atomspektren selber messen: aufbauen, verstehen, forschen (1000 Laser-Hacks für Maker)*, Bombini Verlags GmbH (2022), ISBN: 978-3-946496-27-4
- D. Hausherr, M. Osterheider, B. Bourdon, F. Lager, S. Klomp maker, D. Berben, M. Imlau, *Laserleistung selber messen (1000 Laser-Hacks für Maker)*, Bombini Verlags GmbH (2022), ISBN: 978-3-946496-30-4

B. Appendix

B.1. Case summaries

Student B1

Practical training at home: B1 liked the practical training at home in principle. He praises that one has to deal intensively with the setup and does not have left immediately after finishing the practical training but has as much time as one needs. However, he misses the more direct consultation, which is given in the practical training at the university. Interestingly, he does not like deciding which locality of the practical training he likes. If he had to decide, he would again opt for practical training at home, as he has more peace to carry out the training.

LEGO[®] experience: He states that his last builds with LEGO[®] were some time ago, but describes himself as an experienced LEGO[®] tinkerer.

Spectrometer build from LEGO[®]-bricks: B1 states that the setup and adjustment of the spectrometer worked well. He evaluated these work steps, which were not necessary for usual practical courses at the university, as quite nice and stated that it was possible to experiment reasonably with the finished setup. It is interesting that despite the good evaluation of the construction and the adjustment, he notes various complaints, of which the last one even frustrated him strongly. Stated complaints were: a) the stability of the manual translation stage, b) the fixation of the rotation screw, and c) the holder for the laser pointers.

Opinion on the spectrometer build from LEGO[®]-bricks: B1 enjoyed working with the spectrometer. He cites the construction and adjustment of the spectrometer, as well as the intensive study of the individual components, as reasons. He would recommend experimenting with the spectrometer to other students and could also imagine working with the spectrometer again in practical training. Furthermore, he has no private interest in the spectrometer or in experimenting with it.

Choice of the measuring system: In practical training, his choice would always fall on a self-built measurement system because he enjoys the construction and adjustment of these devices more than simple experiments with already-built, conventional systems. Furthermore, he states that rebuilding an already known measurement system would not appeal to him.

Understanding of the principle of operation: Primarily through the construction, the adjustment, and especially through the characterization of the individual components, B1 understands the functional principle of the spectrometer. He also states that he still researched additional literature and comprehended theories through the assignment and did not only "live

with formulas from the lecture”.

Spectrometer evaluation: He considers the spectrometer to be sufficiently accurate to make various measurements with it, although the accuracy of a ”multiple 1000 euro spectrometer” should be greater.

Trust in measurement systems: B1 states that he trusts the measurement data of the spectrometer because its measured values agree with his theoretical calculations. However, he trusts the measurement data of a commercial spectrometer more since the cost is ”several times more than this”. Interestingly, he considers the settings he made himself to be the greatest source of error and, neglecting these, trusts the measurement data of both measurement systems equally.

Evaluation of previous physics practical training : He states that the previous experiments in physics practicals were rather boring and that there was no opportunity to independently set up or adjust optical measuring systems in any practical training.

Student B2

Practical training at home: B2 liked the practical training very much and rates it as particularly creative and exciting. He praises that he could organize his time freely and did not have a strict schedule. Interestingly, he finds the internship very time-consuming and, for this reason, would prefer an internship at the university in the future. He also misses the opportunity to consult directly with fellow students and supervisors.

LEGO[®] experience: He describes his experiences with LEGO[®] as rather rudimentary.

Spectrometer build from LEGO[®]-bricks: B2 considers the construction of the spectrometer to be solid. He rates the functionality of the individual components as very good and fitting for the applications. Despite the good evaluation of the setup, B2 wishes to improve the linear translation stage and the mounting of the laser pointers.

Opinion on the spectrometer build from LEGO[®]-bricks: B2 liked the spectrometer very much and found especially the chemical investigation with the spectrometer, which was unknown to him so far, interesting because it is ”an practical application”. He would recommend his fellow students to experiment with the spectrometer. As a reason for this, he mentions the intensive occupation with the topic by adjusting the spectrometer and the determination of the angular dispersion and the linear dispersion.

Choice of the measuring system: B2 could imagine working with the spectrometer again in future practical training, provided that it has already been built since it arouses a certain play instinct due to the usage of LEGO[®]-bricks. Nevertheless, he would choose to work with a conventional spectrometer in future practical training, as he considers it important, especially with regard to professional life, to have already operated such a device.

Understanding of the principle of operation: The open design of the tasks have greatly helped B2 to understand the function of the spectrometer. He states that he started researching on the internet and in literature sources due to the assignment. He also states that using a CD as an optical grating has increased his understanding significantly.

Spectrometer evaluation: He considers the spectrometer well suited for "the practical application of concentration determination" and for applications where a broadband spectrum must be resolved over the entire CCD, especially when working with students. However, for "highly sophisticated scientific" applications, he does not consider the spectrometer suitable.

Trust in measurement systems: B2 trusts the data of a conventional spectrometer more than the data of the self-built spectrometer. Interestingly, he attributes this trust deficit exclusively to the calibration and adjustment he performed.

Evaluation of previous physics practical training's: B2 would be confident to work on and solve an unknown problem using the spectrometer.

Confidence in using the spectrometer: B2 would be confident to work on and solve an unknown problem using the spectrometer.

Student B3

Practical training at home: B3 liked the practical training at home because it was something "completely different" and offered the opportunity to "tinker". He liked the free time management of the experiments. He rates the freedom in implementing the practical training tasks as good but expresses frustration from time to time due to the open design of tasks and would have liked a script. He would prefer future practical training at the university over practical training at home since he can make better arrangements with fellow students.

LEGO[®] experience: The last time B3 worked with LEGO[®]-bricks he was still a child. Since he worked a lot with Fischertechnik[®], it describes itself in terms of working with LEGO[®] as "good prepared".

Spectrometer build from LEGO[®]-bricks: B3 finds the setup and instructions of the spectrometer very good but had minor problems during the first setup, which he attributes to the fact that he was not aware of how "the whole thing should look". He also notes some complaints regarding the setups of the components. The complaints were: a) the holder of the laser pointers, b) the linear translation stage, and c) the fixation of the rotating screw of the large mirror holder.

Opinion on the spectrometer build from LEGO[®]-bricks: B3 liked the spectrometer very much and could imagine working with it again in future practical training, provided that the practical training takes place during the semester and not during the semester break. He has already recommended experimenting with the spectrometer to fellow students. He has no private interest in the spectrometer or in experimenting with it.

Choice of the measuring system: He considers a conventional measuring system to be "more user-friendly" since the mechanic components are of higher quality in these. Nevertheless, he would choose to experiment with the self build measurement system out of "a play instinct". He also expresses that the spectrometer has the advantage that it can be easily adapted for other experimental needs.

Understanding of the principle of operation: The open design of the tasks have greatly helped B3 understand the spectrometer's working principle since he had to dive deeply into the subject. He also expresses that he learned a lot by trial and error while experimenting.

Spectrometer evaluation: B3 considers the spectrometer not as accurate as a commercial spectrometer, mainly due to the "movement" in the components. Therefore, he would rely on a commercial spectrometer for accurate measurement.

Trust in measurement systems: He considers the spectrometer's data less accurate than that of a commercial spectrometer since these "are specially designed for the purpose, and LEGO is not".

Evaluation of previous physics practical training's: He expresses that he has learned little in previous practical training, as there is too strict a set of guidelines for conducting experiments that do not require more thought.

Confidence in using the spectrometer: B3 would be confident to work on a new and unknown task using the self-build spectrometer since it is an open system that he can be adapted to any task.

B.2. Interview guideline

With the help of this interview, the spectrometer practical training as well as the measuring instruments used in the practical training will be evaluated. The entire interview will be recorded. Do you agree with this?

Block 1 (locality of the practical training):

- How did you like the practical training at home? What are the reasons for it?
- What aspects of the practical training at home did you like and what aspects of a practical training at university do you like? What are the reasons for them?
- How did you like the practical training at home compared to previous practical trainings at the university? What did you find good and what bad?
- To what extent would you prefer to do a future practical training at university or at home?

Block 2 (spectrometer):

- Have you had any experience in building LEGO[®] models before the practical training? If this is the case, how would you rate your knowledge of building LEGO[®] models?
- How did the setup of the spectrometer go? Were there any problems? What could be improved and how?
- How would you rate the spectrometer instructions?
- How would you rate the handling of the individual components such as the mirror holders? Was the functionality of the components sufficient for the tasks?
- What factors in the practical training were particularly crucial to your understanding of the basic operating principle of a Czerny-Turner spectrometer?
- How much did the spectrometer and its construction or the characterization of the components help you to understand the working principle of the spectrometer?
- How would you rate the handling and use of the spectrometer?

Block 3 (own position to the spectrometer):

- To what extent did you enjoy working with the spectrometer?
- If you had the opportunity to choose between commercially available measurement systems and self-built measurement systems in a future practical training, for what reasons would you choose which?
- Could you imagine experimenting with the spectrometer privately, away from university events? What are the reasons for this?
- Could you imagine working further with the spectrometer in a more advanced practical training on the same topic?

- To what extent would you recommend using the spectrometer or a commercially available spectrometer for a future practical training? What are the reasons for your recommendation?
- To what extent would you recommend students to experiment with the spectrometer in at least one practical course?

Block 4 (reference to the spectrometer):

- What factors in the practical training were particularly crucial to your understanding of the basic operating principle of a Czerny-Turner spectrometer?
- How much did the spectrometer and its construction or the characterization of the components help you to understand the working principle of the spectrometer?
- How would you rate the suitability of the spectrometer you set up and adjusted for practical use?
- To what extent do you trust the measurement data of the spectrometer you have set up, especially with regard to measurement accuracy?
- To what extent do you trust the measurement data of a commercially available spectrometer with regard to measurement accuracy?
- To what extent do you feel confident in using the spectrometer for a new and unknown task?

Block 5 (demographic data):

- What's your name?
- How old are you?
- What are you studying?
- What semester are you currently in?
- Where do you study?

B.3. Coded text passages

Practical training in physics at home (PZ)

Codings (5)

- "Ich würde sagen, dass Praktikum Zuhause hat mir ganz gut gefallen. Insgesamt weil es einfach mal was völlig anderes war und man mal so für sich auch irgendwie ein bisschen daran, daran herum basteln konnte irgendwie und auch vieles neues ja gelernt hat und und und so weiter." (Interview B3, Z. 13-17)
- "Eigentlich sehr gut, weil das mal was anderes war und ich das ziemlich kreativ und spannend fand." (Interview B2, Z. 12-13)
- "(überlegt) genau also, ich fand es gut, dass wir erst mal ziemlich allgemein darauf eingegangen sind, jetzt die Justierschraube um eine Umdrehung drehen, damit man mal ein Gefühl dafür bekommt" (Interview B2, Z. 107-109)
- "Eigentlich sehr gut, weil das mal was anderes war und ich das ziemlich kreativ und spannend fand." (Interview B2, Z. 107-109)
- "Das hat mir prinzipiell ganz gut gefallen, war erst ein bisschen schwierig platz zu finden für die ganze Geschichte, aber so insgesamt war es wirklich nett. Da hat man sich so normal im Physiklabor un der Uni hat man sich jetzt eigentlich nie mit dem Aufbau so beschäftigt. Es stand immer eigentlich schon fertig da, man hat dann nur noch einen Versuch durchgeführt und jetzt wo man auch die Sachen mal tatsächlich selber justieren muss dann so (...). Ja das war eigentlich schon ganz nett." (Interview B1, Z. 12-17)
- "Also Spaß hat mir auch wirklich gemacht, dass man da sich Zeit- relativ tief greifend mit dem Thema beschäftigt hat, tatsächlich mit dem Aufbau, dann mal nachgeguckt was- also Funktionsprinzip von dem Spektrometer da, das war ja auch ne Aufgabe glaube ich in Phase zwei oder drei, dass man ja die Funktion von den einzelnen Komponenten tatsächlich mal beschreiben soll, dass man sich da so Gedanken drüber machen musste (...)" (Interview B1, Z. 148-153)

Practical training in physics at home (PZ) - Task

Codings (4)

- "Und und ich fand es sehr Interessant den- also obwohl das ja nicht das ist, was wir studieren diesen chemischen Aspekt mit der Bestimmung der Konzentration der Lösung das hat mir auch ziemlich gut gefallen, weil das mal auch mal ne praktische Anwendung ist. Ja also das wäre ja tatsächlich was, wenn man jetzt sich auf Optik spezialisieren würde und man käme irgendwo in ein Unternehmen, wo die sagen würden "Hier ist also unser Spektrometer ist jetzt nicht aus LEGO aber hier ist unser Spektrometer und wir müssen da jetzt eine Konzentration" bestimmen wo man sich vorstellen kann, dass das ein richtiger Anwendungsfall ist." (Interview B2, Z. 115-124)
- "Ja, also eigentlich tatsächlich, dass man sich selber mit dem Aufbau beschäftigen muss, also dass man da tatsächlich relativ lange sitzt, sich relativ intensiv damit beschäftigt und nicht einfach nur- mehr oder weniger einmal hin, eineinhalb Stunden irgendwas macht,

wieder abdampft (...) und dann einen Bericht dazu schreibt, sondern, dass man tatsächlich länger da sitzt, sich Gedanken machen muss warum hat das jetzt vielleicht beim Aufbau nicht so richtig geklappt (...)" (Interview B1, Z. 20-25)

- "so und da ging eigentlich auch ganz gut, sodass man also auch diese Kurzanleitung, wie man das Spektrometer eben halt justiert, das war eigentlich schon so gut erklärt." (Interview B1, Z. 92-94)
- "Also Spaß hat mir auch wirklich gemacht, dass man da sich Zeit- relativ tief greifend mit dem Thema beschäftigt hat, tatsächlich mit dem Aufbau, dann mal nachgeguckt was-also Funktionsprinzip von dem Spektrometer da, das war ja auch ne Aufgabe glaube ich in Phase zwei oder drei, dass man ja die Funktion von den einzelnen Komponenten tatsächlich mal beschreiben soll, dass man sich da so Gedanken drüber machen musste (...). Ja, dass man tatsächlich auch mal ein bisschen- also dass man erst mal- also, dass man das Ding erst mal vernünftig justiert, dass man dann auch ein Versuch damit abschließend macht eben halt diese Lösungsbestimmung, die Dichtbestimmung also mir hat eigentlich so insgesamt gefallen, dass man mehr oder weniger ja einfach tatsächlich mal ein kompletten Aufbau von dem Gerät macht, das feinjustiert und Versuche damit macht, mit dem selbst eingestellten und gebauten Gerät, ja das fand ich gut daran." (Interview B1, Z. 148-159)

Practical training in physics at home (PZ) - Interaction Codins (3)

- "Wenn man jetzt tatsächlich sich absprechen will und mit den, mit den Kommilitonen überlegt, wie die das gemacht haben, ist es sehr viel einfacher, wenn an an der Hochschule ist, weil- oder wenn man sich zumindest direkt sieht, weil es war sehr häufig die Situation irgendwie: "Wie hast du denn das und das gemacht" und "Ja ich schick dir mal ein Foto" und dann "Wie, da erkennt man doch gar nichts drauf" und "Dann mache ich dir hier mal ein Pfeil rein" und das war halt übers- übers Internet dann schon irgendwie ein bisschen, ein bisschen pelzig und wenn man halt nebeneinander sitzt, dann kann man direkt darauf zeigen und sagen "Hier wie hast du das denn so gemacht" und so weiter. Das ist halt an der Hochschule auf jeden Fall besser." (Interview B3, Z. 57-67)
- "Was damit einher geht ist auch ein bisschen meine Kritik da dran und zwar es ist natürlich ziemlich zeitintensiv, wenn man das dann alles von vorne rein machen muss und auch zum Beispiel- ja sich- ja es gab jetzt für uns nicht die Möglichkeit, wie es in den meisten anderen Praktika gab, mal ein Semester höher zu fragen, wie das denn da aussieht "Wie habt ihr zum Beispiel jetzt die lineare Dispersion hergeleitet", da hatte ich ziemliche Probleme mit oder so, sondern man musste sich alles quasi from scratch erarbeiten und- ja- das- das war es ja." (Interview B2, Z. 19-26)
- "Oh, schwierig. Kann ich gar nicht so genau sagen, also prinzipiell in der Hochschule ist natürlich der Vorteil, dass man direkter Rücksprache halten kann, aber so Zuhause hat es mir eigentlich auf ganz gut gefallen." (Interview B1, Z. 35-37)

Practical training in physics at home (PZ) - Locality Codings (4)

- "Ich glaube ich würde, wenn es jetzt, wenn es jetzt wieder geht tatsächlich die Praktika in der Hochschule vorziehen, einfach aus diesem- einfach aus diesem Zusammenarbeitsaspekt, weil es halt wirklich sehr viel besser klappt, wenn man- im Praktikum hat man ja meistens dann auch- arbeitet man zu zweit und ich finde durch diese Ergänzung von den beiden ist es doch sehr viel einfacher das Ganze zu machen." (Interview B3, Z. 67-72)
- "hm (bejahend) also, wenn es jetzt um den Zeitaufwand geht, würde ich die Hochschule bevorzugen, weil das ist ein eineinhalb stündiges Praktikum. Man hat im Semester sowieso immer wenig Zeit, dann kommt man ins in der Hochschule kommt man ins Labor macht das eineinhalb Stunden seine Messungen, setzt sich Zuhause hin und macht die Ausarbeitung das dauert vielleicht noch mal fünf Stunden, aber das ist nicht- sieben Stunden Aufbau, zwei Stunden Abbau noch dazu. Es ist halt eher so- ja so ein extra was man machen kann aber es wäre jetzt nicht was wir jetzt jedes Praktikum in jedem Fach das ganze Semester über." (Interview B2, Z. 30-37)
- "Ja, ich glaube eigentlich wäre es mir dann egal gewesen, also wenn es genau so dann auch in der Hochschule abgelaufen wäre, dass man das über das gesamte Semester begleitend gemacht hätte, dann hätte ich das eigentlich genau so gut gefunden." (Interview B1, Z. 30-32)
- "B: Ich glaube, dann würde ich es lieber Zuhause machen.
I: Aus welchem Grund?
B: (...) Ja (...). Ja ich glaube da hat man einfach so ein bisschen mehr so die Ruhe." (Interview B1, Z. 43-45)

Practical training in physics at home (PZ) - Time Codings (4)

- "Was mir gefallen hat war, dass man so ein bisschen auf jeden Fall freier ist, was die Zeitplanung angeht, weil wenn man in der FH ist, ist natürlich klar, dass man das innerhalb dieser eineinhalb Stunden, die man dann da ist, auch schaffen muss und das ist teilweise ein bisschen schwierig gewesen, wenn man da ist. Und hier hatte man das hat, dass man sich das selber aufteilen konnte, also man hatte wenn man jetzt für einen Versuch länger gebraucht hat, war das nicht so, nicht so tragisch, sondern dann hat man halt für den nächsten- für den nächsten halt ein bisschen weiter weggeschoben sozusagen- und das fand ich sehr gut." (Interview B3, Z. 38-42)
- "Auf jeden Fall, war ne gute Sache- kann man auch könnte man auch öfter machen nur halt wie gesagt nicht in jedem Fach jedes Semester, sondern vielleicht ein Fach pro Semester, weil wir haben ja fünf Praktika bei uns zum Beispiel in einem Semester und das ist dann, das wäre dann ein bisschen viel glaube ich." (Interview B2, Z. 40-43)
- "Ja, dass man da auch länger dran Zeit hat, sich damit zu beschäftigen." (Interview B1, Z. 25-26)

Practical training in physics at home (PZ) - Freedom of implementation Codings (2)

- "[...] das fand ich sehr gut. Und auch das es relativ frei war, also nicht so machen Sie jetzt das, machen Sie jetzt das, machen Sie jetzt das, sondern man musste so ein bisschen selber auch tüfteln und gucken, wie man das jetzt am Besten misst und so weiter, allerdings hat das auch ne Kehrseite finde ich, weil einige male war es ein bisschen frustrierend, wenn man jetzt irgendwie sag ich mal jetzt zwei Stunden irgendwas gemessen hat und dann, kommt einer von den Anderen beiden und sagt: "Nö ich habe das Ergebnis" und dann denkt man sich so Mist (lacht) #00:03:43#. Das war dann teilweise auch- naja schöner wenn man, wenn man dann nun wirklich Anleitungen hat, aber insgesamt fand ich es eigentlich gut, dass man so so frei und- selber ein bisschen tüfteln musste." (Interview B3, Z. 45-54)
- "Gut gefallen hat mir, dass man sich ein bisschen mehr ausleben konnte, also man musste sich nicht jetzt strickt an einen Rahmen halten. Und konnte auch mal gucken wie das jetzt ist wenn man mit dem Spalt zum Beispiel da mal ein Blatt Papier vor hält oder zwei das war ganz cool." (Interview B2, Z. 16-19)

Previous physics practical training (BP) Codings (4)

- "Was mir gefallen hat war, dass man so ein bisschen auf jeden Fall freier ist, was die Zeitplanung angeht, weil wenn man in der FH ist, ist natürlich klar, dass man das innerhalb dieser eineinhalb Stunden, die man dann da ist, auch schaffen muss und das ist teilweise ein bisschen schwierig gewesen, wenn man da ist." (Interview B3, Z. 38-41)
- "Es ist ja häufig bei anderen Praktika wie wir sie jetzt in der Hochschule haben, weil man ja auch nur diese eineinhalb Stunden dafür Zeit hat, ist es halt häufig so jetzt messen Sie das und bitte messen Sie jetzt so das und ich sage mal da lernt man relativ wenig würde ich sagen, weil es halt wirklich einfach nur ein Kochrezept ist und ich würde jetzt sagen von einem wirklich eindeutigen Kochrezept lernt man jetzt auch nicht wirklich kochen (lacht). Man macht halt einfach man wirft halt irgendwie alles in einen Topf und acht halt einfach so und dann geht man wieder raus und ja und so eigentlich wirklich selber was gemacht (lacht) hat man eigentlich nicht." (Interview B3, Z. 245-253)
- "hm (bejahend) also, wenn es jetzt um den Zeitaufwand geht, würde ich die Hochschule bevorzugen, weil das ist ein eineinhalb stündiges Praktikum" (Interview B2, Z. 30-31)
- "Da hat man sich so normal im Physiklabor und der Uni hat man sich jetzt eigentlich nie mit dem Aufbau so beschäftigt. Es stand immer eigentlich schon fertig da, man hat dann nur noch einen Versuch durchgeführt und jetzt wo man auch die Sachen mal tatsächlich selber justieren muss dann so (...)." (Interview B1, Z. 13-17)

Handling of the Spectrometer build from LEGO® bricks (HLS) Codings (3)

- "Auch gut, also am Anfang hatte ich ein bisschen Probleme, aber ich glaube, dass ist klar, weil ich wusste halt nicht so wirklich wie das Ganze aussehen muss und so weiter und

da haben wir und auch viel untereinander angesprochen, wie das denn bei den anderen aussieht und dann hatten die anderen irgendwie schon so ein ganz schönes Spektrum, wir hatten das alle erst mal mit der weißen LED gemacht, und das Spektrum auch bei allen irgendwie ganz schön aus, nur bei mir war das irgendwie so Brei und dann haben wir halt getüftelt und so und ich hatte das irgendwie nicht so wirklich hingekriegt und dann habe ich aber. Ich hatte das vorher halt mit der CD gemacht und dann habe ich die CD durch das Gitter ersetzt und dann hat das bei mir auch auch super geklappt. Ja das Erste ist hat so ein bisschen- bisschen frickelig bis man das dann so hinkriegt, dass das so in die richtige Richtung leuchtet und so weiter, aber das ist halt die erste Eingewöhnungsphase und dann geht das alles eigentlich sehr gut. Also war schon- war schon gut.” (Interview B3, Z. 138-150)

- ”Das einzige was mich bei der Handhabung mit dem Spektrometer gestört hat war, dass es gab ja diesen Moment wo man das Spektrometer mit der weißen also zum Beispiel mit irgendeiner breitbandigen Leuchtmittel eingestellt hat zum Beispiel mit der weiß markierten LED habe ich das gemacht. Dann hatte man sozusagen das Spektrum drauf und dann sollte man mit den Laserpointern gucken wie- wo die jetzt diese Wellenlängen auf der CCD jetzt landen. Das fand ich ziemlich schwierig den Laserpointer da so oder die Laserpointer so hin zu bekommen, dass die dann wirklich auch die CCD treffen und ja ich glaube das hatte auch irgendwer schon im Seminar angemerkt, da hat war dann auch recht viel Spiel, dann wenn man das getroffen hat, weil man sowieso so ne unnatürliche Position des Laserpointers haben musste. Ja, das ist das man da ein bisschen Spiel hatte. Aber ansonsten alles gut, das ist das Einzige, was ich zu bemängeln habe.” (Interview B2, Z. 89-100)
- ”Ja Handhabung fand ich war eigentlich ganz vernünftig also nachdem es dann erst mal - also das Einstellen und so was hat natürlich ein bisschen länger gedauert, weil man es jetzt zum ersten mal gemacht hat, aber (...) das hat ganz gut funktioniert, wie gesagt Spiegel haben nicht groß herum gewackelt nachdem sie Eingestellt waren, sind sie in der richtigen Position geblieben, hat alles funktioniert. Man konnte dann auch mit dem Aufbau dann anscheinend relativ vernünftig die Versuche durchführen, also es kam überall so Messwerte raus, die schon so aussehen, als ob sie realistisch sein könnten halt so Handhabung war ganz okay.” (Interview B1, Z. 134-141)

Handling of the Spectrometer build from LEGO[®] bricks (HLS) - Experience with LEGO[®] model's Codierungen (3)

- ”Also LEGO habe ich als Kind halt gebaut, allerdings war ich nie so der LEGO- der LEGO-Typ, sondern ich habe viel mit Fischertechnik gebaut, falls dir das was sagt und da habe ich wirklich, also Jahre rein gesetzt (lacht) kann man sagen, also das habe ich wirklich, wirklich sehr viel gemacht, deshalb würde ich sagen obwohl es halt kein LEGO war, was ja schon relativ ähnlich so nach Anleitung irgendwas Aufbauen und so weiter würde ich mich da schon- schon so bezeichnen, dass ich das- dass ich da ganz gut dabei bin.” (Interview B3, Z. 87-93)
- ”Also die Erfahrungen die ich gesammelt habe sind über 15 Jahre her, deswegen war meine Kenntnis- ja sehr rudimentär als ich das Modell bekommen habe. Also ich na klar

man weiß man wie LEGO-Steine aufeinander gesteckt werden und so und wie das in etwa funktionieren muss, damit das in etwa funktionieren muss damit das stabil ist. Immer auf Lücke und so, aber ansonsten keine großen Erfahrungen.” (Interview B2, Z. 50-54)

- ”Also die Erfahrung mit LEGO Aufbau liegt jetzt auch schon ein bisschen zurück, eher so Grundschule, aber (...) ja damals habe ich relativ viel damit gemacht, also es war jetzt nicht komplett was neues mit LEGO zu bauen, das hat an sich auch alles ganz gut geklappt (...) ja also erfahrungsgemäß erfahrener LEGO-Bastler (lacht).” (Interview B1, Z. 52-55)

Handling of the Spectrometer build from LEGO[®] bricks (HLS) - Improvements

Codings (8)

- ”Also ich fand es als wir zum Beispiel die, wir sollten ja einmal das Auflösungsvermögen der CCD mit den beiden Laserpointern messen und da fand ich es ein bisschen ich sag mal ein bisschen nervig, weil man musste dann öfter mal wechseln zwischen den Laserpointern und man konnte es nie so so einstellen, dass die quasi an ungefähr einer Stelle sind, sondern du hast, man hat immer irgendwie so ein bisschen rumgefriemelt und so weiter. Und ich fände es irgendwie cool, wenn es dafür und auch für die LEDs vielleicht bessere Halterungen gäbe.” (Interview B3, Z. 19-25)
- ”Das war (4 sek.) ja genau beim Spalt- beim Spalt war ein Ableitungsbild, was tatsächlich so gar nicht in echt aussah und das hat ein bisschen Verwirrung gestiftet. War dann im Endeffekt nicht nicht schlimm, weil man sich schon gedacht hat hm das kann ja irgendwie so nicht passen, aber- genau beim Spalt bei der Anleitung bei Bild 23 (8 sek.). Ne das war noch ein bisschen weiter, ich guck gerade- ah ne, bei Bild 31, da ist es (5 sek.) und zwar jetzt muss ich das ja irgendwie beschreiben. Man sieht da, dass- also auf diesem Ding was da vor und zurück fährt mit dem Zahnrad dran oben drauf ist dieses komische LEGO-Teil, was es nur ein mal gibt, diese kleine Platte mit den zwei Noppeln und oben diesem- dieser runden Öffnung dran (I: Ja). So und die wird da irgendwie- also man sieht da die- also bei Bild 31 die schwarzen Teile da drüber sind quasi direkt auf dem Teil und das ist in Wirklichkeit nicht so. Da ist ne Lücke Zwischen. Und das hat mich verwirrt, weil ich dachte hä muss ich das jetzt irgendwie da fest machen und dann habe ich irgendwie versucht das da fest zu machen- aber das geht auch gar nicht, also man kann das tatsächlich nicht da fest machen, deshalb- das hat kurz verwirrt, aber sonst war, war nichts.” (Interview B3, Z. 103-117)
- ”Die war auch gut, also ab und zu- also beim beim kleinen Spiegel könnte man vielleicht verbessern, dass beim horizontalen verschieben- wurde der ja durch Gummis quasi wurde ja das Spiel ausgeglichen und bei mir ist es sehr häufig passiert- dadurch dass ich den auch, ich weiß jetzt nicht ob das richtig ist, aber ich habe den relativ weit nach vorne gefahren, weil bei mir dann die Ergebnisse tatsächlich besser waren. Und diese beiden Halter wo die, wo die Gummis dran waren, rechts und links die waren ja nur an einem Block unten an der Grundplatte fest und die sind dann häufig mal abgerissen also die die LEGO-Steine und dass man da vielleicht noch mal irgendwie ne Befestigung für macht oder so, dass die ein bisschen- ein bisschen stabiler sind, aber ich weiß jetzt nicht, vielleicht habe ich auch falsch gemacht, weil ich den zu weit nach vorne gefahren habe, also dass ist mir aufgefallen.” (Interview B3, Z. 122-132)

- "Ach so das war übrigens auch noch, nicht nur beim kleinen Spiegel, dass die- dass die Gummis abgegangen sind, sondern beim großen Spiegel, war das glaube ich, da war ja diese große Zahnrad unten und da war ja die Schnecke dran diese- die das halt dreht und diese Schnecke ist halt bei mir häufiger mal abgesprungen, sodass sich das- der große Spiegel komplett wieder in eine (// I: Ah okay.) andere Position zurückgesprungen ist durch die Gummis und das- so was würde halt bei einem konventionellen Spektrometer nicht passieren, also man hätte ein bisschen weniger- müsste man sich drum kümmern, dass ist alles- das es alles richtig eingestellt ist oder so, glaube ich." (Interview B3, Z. 182-190)
- "Was mir aufgefallen ist jetzt von der Stabilität des LEGO-Modells. Beim Spiegelhalter für den großen Spiegel hatte ich das Problem, dass der- ich brauchte den an einer Position, die so weit vorne war, dass- das- mit dem Aufbau so wie er war schwer zu erreichen war also es war schon an der Grenze des- wofür das gedacht war aber an sonsten war eigentlich alle in Ordnung." (Interview B2, Z. 67-71)
- "Dann hatte man sozusagen das Spektrum drauf und dann sollte man mit den Laserpointern gucken wie- wo die jetzt diese Wellenlängen auf der CCD jetzt landen. Das fand ich ziemlich schwierig den Laserpointer da so oder die Laserpointer so hin zu bekommen, dass die dann wirklich auch die CCD treffen und ja ich glaube das hatte auch irgendwer schon im Seminar angemerkt, da hat war dann auch recht viel Spiel dann wenn man das getroffen hat, weil man sowieso so ne unnatürliche Position des Laserpointers haben musste. Ja, das ist das man da ein bisschen Spiel hatte." (Interview B2, Z. 92-99)
- "Ja ist mir später noch mal aufgefallen, beim durch die Anleitung gucken, was ich schwierig fand war (...) beim kleinen Spiegel einmal das nach vorne und hinten Verschieben, dass hat mich gestört, weil die Halterung, die das runter gedrückt hat auf die Rillen, also um das nach vorne und hinten zu verschieben (...), wenn man jetzt ein bisschen zu weit nach hinten gedreht hat oder so was, dann ist das gerne mal abgegangen, hat sich gelöst, dann musste man es wieder runter drücken, das fand ich so ein bisschen frickelig. Und mit den Gummibändern war vielleicht ein bisschen viel Zug auf dem (...) Teller, wo man das nach rechts und links gedreht hat, da ist dann teilweise von dem- das waren ja diese zwei beige farbigen ja Kreuz-Noppel Kombinationsdinger, die da dran gemacht waren, wo dann das Zahnrad dran hing und da war dann ein bisschen- weiß ich nicht, vielleicht lag es auch nur an der Anordnung, wie ich die Gummis jetzt dran gemacht habe, aber teilweise war da so ein bisschen viel Zug drauf, dass da manchmal, wenn man es zu viel oder zu weit in eine Richtung gedreht hat, dass es dann gerne mal abgesprungen ist an der einen Seite, das war dann auch wieder ein bisschen nervig das jedes mal wieder dran zu drücken, weil das relativ häufig passiert einem Einstellen bis ich es dann erst mal in der richtigen Position hatte" (Interview B1, Z. 61-77)
- "und der richtige Kasus-Kanktus war der Halter vom Laserpointer. Der hat mich wirklich extrem frustriert, weil (...) gefühlt habe ich es einfach nicht hingekriegt den so zu platzieren, dass er auf der LEGO-Grundplatte stand und das- den Spalt getroffen hat. Also so, dass er den - er hat den Spalt nie so getroffen, dass er danach noch vernünftig auf den kleinen Spiegel gekommen ist um dann eben durch das Spektrometer geschleudert zu werden (...) deswegen, das lief dann bei mir so ab, dass ich den mehr oder weniger

nur so halb fest auf die Bodenplatte gedrückt habe, dann den Laserpointer so ein bisschen nach oben und unten gedrückt habe in diesen Gummihaltern und so was. Den fand ich extrem frickelig diesen Halter, da würde ich mir vielleicht auch irgendwie- ich weiß nicht, ne Überarbeitung wünschen, der Rest, der hat eigentlich ganz gut geklappt.” (Interview B1, Z. 77-88)

Handling of the Spectrometer build from LEGO[®] bricks (HLS) - Structure Codings (5)

- ”Nö, es war ne gute Anleitung fand ich. Also alles- alles gut. Ich konnte es so aufbauen- also ich hatte jetzt glaube ich keine Probleme mit der Anleitung.” (Interview B3, Z. 97-98)
- ”Eigentlich war ist das ziemlich gut gelaufen ich bin in der vorgegebenen Zeit, das waren glaube ich sieben Stunden ne? (I1: hm (bejahend)) Bin ich bin ich recht gut durch gekommen glaube ich habe sechseinhalb oder so was gebraucht. Ja hat alles gut funktioniert. An sich der Aufbau so war so solide, also auch so, dass man also die meisten Teile waren nicht so, dass man sie angefasst hat und sie auseinander gefallen sind, also es war schon war schon nicht schlecht.” (Interview B2, Z. 60-65)
- ”Nein die Aufbauanleitung war ziemlich gut. Ja die war Aufbauanleitung war sehr gut, sehr ausführlich” (Interview B2, Z. 75-76)
- ”Also prinzipiell haben die Sachen ganz gut geklappt.” (Interview B1, Z. 78)
- ”Das fand ich eigentlich alles relativ gut erklärt, da konnte ich eigentlich genau so nach der Anleitung die Sachen runter arbeiten da sind jetzt glaube ich nicht so großartig neue Fragen hinzugekommen (...) so und da ging eigentlich auch ganz gut, sodass man also auch diese Kurzanleitung, wie man das Spektrometer eben halt justiert, das war eigentlich schon so gut erklärt. (...) Das einzige was ich hatte ist, dass ich mehr oder weniger das Gitter einmal falsch herum reingesetzt hab, dass die Maxima statt seitlich eben halt nach oben und unten geworfen wurden (// I: Ja Okay) (...). Das hat leider auch einen Moment gedauert, bis ich das gerafft hatte (lacht) was das Problem war.” (Interview B1, Z. 90-98)

Handling of the Spectrometer build from LEGO[®] bricks (HLS) - Functionality Codings (3)

- ”I: War denn den Funktionalität der Komponenten für die Aufgabenstellung ausreichend?
B: Ja, dass würde ich sagen, ja. Also es hat- hat gut geklappt.” (Interview B3, Absatz 133-135)
- ”Die Funktionalität war sehr, würde ich als sehr gut bewerten also alles hat auf jeden Fall das gemacht was es sollte. War jetzt bei den meisten Teilen nur horizontal drehen und vielleicht- ach oder horizontal drehen und verschieben aber ja waren alle sehr gut.” (Interview B2, Z. 81-84)
- ”Funktionalität war eigentlich so im Großen und Ganzen ausreichend, wie gesagt beim kleinen Spiegelhalter, dass dieses eine Noppending permanent abgegangen ist - oder was heißt permanent öfters beim Einstellen abgegangen ist, danach hat man ja nicht mehr daran herumgedreht, nachdem es dann einmal in einer Position war war gut, da hat sich

auch großartig nichts verstellt, also durch die Gummibänder war das schon ausreichend stabil und genau.” (Interview B1, Z. 104-109)

Personal attitude towards the spectrometer build from LEGO®-bricks (ELS) Codings (6)

- ”I: Okay, dann kommen wir zum nächsten Block, dass ist schon der vorletzte und zwar zu deiner eigenen Position zum Spektrometer, wie du so selber dazu stehst. Und und zwar ganz allgemein erst mal, wie hat dir überhaupt die Arbeit mit dem LEGO-Spektrometer gefallen?

B: Ja, hab ich ja schon gesagt, also hat mir gut gefallen, ja. Also, ja ich glaube, da habe ich schon viel zu gesagt.” (Interview B3, Z. 149-156)

- ”I: Ja. Okay, jetzt vielleicht so ein kleine Gedankenexperiment, könntest du dir vorstellen, in einem weiterführenden Praktikum zum selben Thema- also wieder Spektrometer, weiter mit dem LEGO-Spektrometer zu arbeiten?

B: Ja, das könnte ich mir vorstellen. Denke ich ja. (...) Es ist halt nur immer, so ein bisschen, aber da kannst du jetzt natürlich nichts für, es ist jetzt natürlich immer, dass- dass das jetzt in den- in den Semesterferien quasi stattgefunden hat, ist natürlich- ich hatte jetzt- wir hatten jetzt letztes Semester ziemlich viel zu tun, weil halt online Semester und irgendwie die Profs kamen erst nicht so richtig- nicht so richtig aus den Puschen und haben dann alles so Richtung Ende gemacht und- aber wie gesagt, da kannst du jetzt nichts für. Und das ist halt jetzt- jetzt müssen wir das halt in den Semesterferien machen und dann kommt hat direkt wieder die Klausurenphase so ungefähr. Aber ansonsten, wenn das ganz normal im Semester stattfinden würde, fände ich das- fände ich das gut, ja würde ich wieder machen. ” (Interview B3, Z. 157-169)

- ”I: Ja gut sehr schön. Dann kommen wir jetzt von dem Spektrometer allgemein zu deiner eigenen Position zum Spektrometer und zwar erst mal wieder etwas allgemeiner. Inwiefern hat die Arbeit mit dem LEGO-Spektrometer gefallen?

B: Ziemlich gut, ja ich fand sehr sehr interessant, was wir gemacht haben.” (Interview B2, Z. 101-104)

- ”Ja, allerdings müsste ich es dann ja noch mal aufbauen, das wäre ja total doof (lacht). Nein doch klar.” (Interview B2, Z. 127-128)

- ”Ganz gut, also fand ich gut.” (Interview B1, Z. 145)

- ”Ja (...) also da würde ich jetzt nicht so das Problem sehen, also (...) also wie gesagt, jetzt hat man ja schon so die Übung, jetzt weiß man wie man es wo Probleme auftreten könnten, wie man es vernünftig feinjustiert, dass es - dass man da alle so- schon mal so ein Gefühl bekommen hat und scheint ja auch so gut zu funktionieren, dass man damit schon gerne auch was weiter messen wollen würde.” (Interview B1, Z. 162-166)

**Personal attitude towards the spectrometer build from LEGO[®]-bricks (ELS)
- Recommendations
Codings (3)**

- "Also ich würde es schon empfehlen, gerade auch in Physik, weil (...) so die Versuche die waren bis jetzt immer relativ mau im Physikpraktikum, das waren ja so Sachen, wie so Erdbeschleunigung- also (...) #00:12:43# Erdanziehungskraft bestimmen und all solche Geschichten, das waren ja einfach immer nur Magnetküglechen oder Eisenküglechen herunterfallen lassen, das war jetzt nicht so richtig aufregend, auch bei den ganzen anderen optischen Sachen, die waren wie gesagt auch immer schon so fertig aufgebaut, da musste man sich eigentlich nicht so richtig Gedanken machen wie das Ganze tatsächlich so tieferliegend funktioniert. So da würde ich den Leuten das schon empfehlen für Physik." (Interview B1, Z. 184-192)
- "Das- das haben wir tatsächlich schon gemacht, also viele haben ja gesagt- also viele haben es tatsächlich auch gar nicht mitbekommen, dass das mit dem- mit dem Praktikum ist, obwohl doch, da wurde eine E-Mail geschrieben, aber Herr B. hatte die- diese Anmeldefrist wo wir uns dann bei dir melden sollten hatte er irgendwie einen Tag vorher in den letzten zwei Minuten seiner Vorlesung gesagt die er als Video hochlädt und einige gucken sich halt das Video gar nicht an dem Tag genau an, sondern irgendwie einen Tag später oder so und dann hatten die schon gar keine Chance sich mehr anzumelden, deshalb haben wahrscheinlich auch nur so wenig mitgemacht, aber viele hatten auch schon im Vorhinein gesagt, ne das ist mir viel zu viel Arbeit, dass mache ich nicht. Ich schreib die Klausur, weil dieses Semester braucht man es ja auch nicht unbedingt. Und ja wir drei haben tatsächlich schon schon mit vielen gesprochen und gesagt "Ach das macht echt Spaß" und "Hättest du das mal mitgemacht" so ungefähr, weil man weiß ja nie ob man jetzt die Klausur schafft und so weiter, aber auch aus dem Aspekt raus, dass es eigentlich echt- das man viel gelernt hat und es echt viel Spaß gemacht hat. Also ich würde es auf jeden Fall weiterempfehlen." (Interview B3, Z. 205-220)
- "I: Okay, inwiefern würdest du denn Studierenden das Experimentieren mit LEGO-Spektrometer in zumindest einem Praktikum empfehlen?
B: Zu 100 Prozent.
I: Aus welchen Gründen?
B: Ja einfach aus den genannten Gründen, die ich gerade schon angesagt habe, weil man es, es gibt einem einen wesentlich tieferen Einblick in das Verständnis, wie das jetzt alles mit der- mit Dispersion also mit Wellenlängenabhängigkeiten und so was, wie das alles funktioniert. Und auch mit auch mit diesen Gittern, das war zum Beispiel ne Sache die mir vorher nicht so eingeleuchtet ist und das ist das habe ich nach dem Versuch auf jeden Fall viel besser verstanden." (Interview B2, Z. 147-156)

Personal attitude towards the spectrometer build from LEGO[®]-bricks (ELS) - Private interest

Codings (3)

- "I: Ah Okay, könntest du dir denn auch abseits von der Hochschulveranstaltung vorstellen, also privat, mit dem LEGO-Spektrometer zu experimentieren und wenn das so sein sollte, was sind die Gründe dafür, dass du das machen würdest oder auch nicht?
B: Ich würde wahrscheinlich hier tatsächlich nein antworten, weil es jetzt nicht unbedingt so mein Gebiet ist, also ich interessiere mich für für andere Sachen (...) sehr viel mehr, aber das liegt jetzt nicht daran, dass das- dass der Versuch blöd war, oder sonst irgendetwas, sondern es ist halt einfach- es ist halt einfach nicht nicht mein Hobby Gebiet, mein mein Interessengebiet und deshalb würde ich es wahrscheinlich nicht machen." (Interview B3, Z. 221-230)
- "Also ein Grund der natürlich stark immer dagegen spricht, ist halt die Zeit, weil- ja vor allem jetzt- wir haben seit drei Wochen vorlesungsfreie Zeit, ich hatte noch keinen freien Tag und vor allem jetzt in diesem Corona-Semester halt, aber ansonsten natürlich, also- Optik ist jetzt bei mir nicht das Fach, was mich von meinem Studium am meisten interessiert, aber ich- wenn bei Studenten, bei den das so ist auf jeden Fall." (Interview B2, Z. 170-175)
- "Oh schwierig, ich wüsste nicht, was ich in ein Spektrometer halten sollte (lacht) (...). Ja ich weiß nicht, also in der Freizeit würde ich jetzt nicht denken, dass ich damit großartig was ausmessen würde (...)." (Interview B1, Z. 195-197)

Understanding the principle of operation (VF)

Codings (5)

- "Ja sonst halt Internet so, überall mal so durchgeguckt und so weiter da habe ich auch viel von mitgenommen, aber auch viel- also sehr viel eigentlich von diesem Experimentellen Teil viel ausprobiert und und ne so geht es nicht und dann noch mal noch mal so, ist auch häufig so meine Herangehensweise, ich weiß jetzt nicht, ob es da- ob es so wissenschaftlich ist, aber ich bin häufig eher so der Typ nicht vorher stundenlang einlesen, wie es denn geht, sondern erst mal ausprobieren und gucken was wo es denn hin leuchtet so ungefähr und was da- das da passiert und dann halt daraus irgendwie weitere Entscheidungen treffen, wie man jetzt dann weiter macht." (Interview B3, Z. 264-272)
- "Dann die Winkeldispersion und die lineare Dispersion, dass man das gemacht hat, hat mir auch ziemlich gut gefallen, weil dann bekommt man finde ich ein sehr tiefes Verständnis dafür, weil in der Vorlesung bei Herrn B., der erzählt einem das zwar, aber der klickt da durch seine und da ist vielleicht ein kleines Bild und da geht ein Strahl auf irgendein Gitter drauf und da kommen bunte Strahlen raus aus dem Bild, aber das man da so ein richtiges Gefühl für bekommt, dass habe ich auf jeden Fall durch das Spektrometer bekommen, das fand ich ziemlich gut." (Interview B2, Z. 109-116)
- "B: Und auch mit auch mit diesen Gittern, das war zum Beispiel ne Sache die mir vorher nicht so eingeleuchtet ist und das ist das habe ich nach dem Versuch auf jeden Fall viel besser verstanden.

I: Was genau dabei?

B: Ja im Endeffekt ist ja so nen Gitter sind erst mal nur so ein paar Linien. Irgendwie angeordnet in einem gewissen Abstand, wenn man da Licht drauf oder scheinen lässt, dass das dann dispersiv reflektiert wird, das ist einem ja vielleicht nicht immer so also so- ich hatte da nicht so 100 prozentig den Zugang vorher, dass ich das, dass das so funktioniert. Da dachte ich, ja okay das kann vielleicht funktionieren, da gibt es dann ganz spezielle Gitter oder so und dann hatte ich die hatte das Spektrometer hier und du sagst, ja schneide das einfach eben mit der, von der CD was aus und dann funktioniert das Ding schon ja (lacht), also das war, das fand ich ziemlich anschaulich und eindrucksvoll.” (Interview B2, Z. 154-166)

- ”Ja, also da muss ich auf jeden Fall sagen ziemlich- ziemlich- ziemlich eindrucksvoll fand ich das mit der CD, dass das einfach mit der CD als Gitter funktioniert hat ja. Also das hat mir auf jeden Fall schon ein erweitertes Verständnis gebracht” (Interview B2, Z. 192-194)
- ”Ich denke das hat schon geholfen, auch gerade mit (...) solchen Sachen wie der Winkeldispersion und der linearen Dispersion, wie die ganzen verschiedenen Wellenlängen da auf die Messfläche treffen und all solche Geschichten. Auch, dass man eben halt nochmal darüber nachdenkt, warum jetzt der Spalt ne ausreichend- ne ausreichende Breite haben muss, all solche Sachen (...). Ja also ich denke, dass hat schon geholfen das- also nachzuvollziehen warum Sachen wie sein müssen im Spektrometer auch mit der Entfernung von Spiegel zu Gitter und von dem Gitter- von dem zweiten Spiegel zur CCD all solche Sachen, dass das vernünftig scharf abgebildet wird, ich denke das hat schon geholfen, dass man sich da- also dass man das alles nachvollziehen kann wie das funktioniert.” (Interview B1, Z. 204-213)

Understanding the principle of operation (VF) - Task Codings (4)

- ”Sehr stark tatsächlich. Dadurch, dass man, wie ich ja auch schon häufig gesagt habe sich das ziemlich viel selbst erarbeiten musste und ich am Anfang tatsächlich kaum ne Ahnung hatte, also ja wir hatten es in Physik in der Vorlesung halt mal durchgesprochen, aber so so im Detail ist das dann ja nicht, also es wird einem vorgestellt hier so funktioniert ein Spektrometer und dann denkt man sich aha ja cool und dann geht es zum nächsten Thema so ungefähr ne? Und dass man halt damit jetzt mal so halt selber rumfriemeln musste und halt wirklich Aufgaben hatte, die man damit jetzt bewältigen musste und halt auch nicht so ne- so ne Schritt für Schritt Anleitung hatte musste man da schon ziemlich tief ins- ins Thema gehen und da habe ich sehr viel gelernt, das das ist schon so.” (Interview B3, Z. 236-245)
- ”Ja ich habe tatsächlich für die- für die- für diese einzelnen Aufgaben auch- es waren ja häufig auch Theorie Aufgaben habe ich mir die Literatur, die du mir- die du uns gegeben hattest angeguckt und ja da habe ich- da habe ich viel gelernt.” (Interview B3, Z. 262-264)
- ”Hab ich ja glaube ich gerade schon so ein bisschen angesprochen, also auf jeden Fall sehr sehr gut, weil auch dadurch, dass man zum Beispiel irgendwann war, war ne Frage mit einem selbst gewählten Experiment. Auch wenn man selbst jetzt nicht direkt auf

ein Experiment kommt, erst mal probiert man herum, dann googelt man vielleicht oder guckt irgendwie anders in Literatur und allein dadurch beschäftigt man sich schon so mit Spektrometern, dass das auf jeden Fall sehr gut geholfen hat.” (Interview B2, Z. 182-187)

- ”Ja, dass- ja vorher hätte ich wahrscheinlich nicht so viel noch in der Zusatzliteratur herumgeblättert um eben halt Herleitungen nachzugucken oder so was, hätte ich dann wahrscheinlich auch einfach mit der Formel, die dann irgendwo mal auf einer Vorlesungsseite steht gelebt und die dann einfach so angewandt, aber so, dass man sieht, woher kommt das, wie kommen die Formeln so zu Stande (...). Ja ich denke, dass ist so tieferliegend dabei hängen geblieben, dass ich das zusätzlich gemacht habe.

I: Hat dir das denn geholfen das - nochmal das Verständnis zu vertiefen für das, was da physikalisch abläuft?

B: Ich denke schon, ja. (...)” (Interview B1, Z. 218-227)

Suitability of the spectrometer (TLS) Codings (2)

- ”Also für die Praxisanwendung der Konzentrationsbestimmung, habe ich ohne großen Aufwand- also ohne, dass ich jetzt Sachen vier, fünf, sechs mal messen musste, bevor es richtig gepasst hat, ziemlich gute Ergebnisse bekommen, die also ich weiß natürlich bis jetzt noch nicht, ob sie ziemlich gut sind, aber sie stimmen einigermaßen gut mit dem überein, was ich aus dem vorherigen Aufgabenteil da auch raus hatte, also sogar ziemlich genau. Deswegen würde ich sagen dafür ist es ziemlich gut. Wie gesagt wenn es darum geht einzelne Wellenlängen jetzt da die Laserpointer auf die CCD zu bekommen oder so, dass ist eher eine Fummelarbeit, wo man ein bisschen mehr Zeit investieren muss. Ja aber diese- also alles was sagen wir übers komplette Spektrum über die komplette Bandbreite der CCD geht, dass das könnte ich auf jeden Fall empfehlen, dass war ziemlich gut, ja ziemlich gut beurteilen.” (Interview B2, Z. 199-209)
- ”Also ich denke, dass funktioniert schon ausreichend gut, also man hat ja jetzt nur so richtig- also man hat ja so die Aufnahmen für die LEDs gesehen, die sahen ja schon so ungefähr zu den Sachen aus, die man auch im Internet findet, also sah schon ausreichend genau aus, dass man damit auch andere Sachen bestimmen könnte, bei der Lösung da kam eigentlich auch was relativ realistisches raus so, auch so mit dem Vergleich zu den Anderen, dass das alles so ungefähr in der selben Größenordnung sich so abspielt, also es scheint schon vernünftig genau zu sein, also dass das- also wenn es halbwegs- gut justiert hat (lacht), dass da auch realistische Werte raus kommen.” (Interview B1, Z. 230-238)

Confidence in using the spectrometer (SUS) Codings (7)

- ”Ja, gerade dass er halt überall so ein bisschen Spiel drin ist und- ich habe mich relativ schwer getan damit, wir sollten das ja mit den beiden Laserpointern machen und vorher mit einer Lichtquelle unserer Wahl glaube ich. Also ich habe das mit der weißen LED gemacht, weil ich dazu halt im Internet ein Spektrum gefunden hatte und habe mir das halt

angeguckt und dann sollte man das ja erst mit dieser weißen LED so ganz grob abschätzen was für ein- was für ein Auflösungsbereich und so weiter man hat. Und dann habe ich das halt mit den beiden Laserpointern gemacht und ich habe es tatsächlich erst- ich habe da glaube ich zwei Stunden dran herum getüftelt gar nicht geschafft, wenn ich die die weiße LED, das Spektrum davon auf der CCD hatte und dann auch die Laserpointer gewechselt bin, dann haben die irgendwo in die Wiese geleuchtet und ich habe es tatsächlich erst gar nicht hin gekriegt, die beide- dass die beide gleichzeitig quasi auf die CCD leuchten, wenn man sie tauscht und deshalb, also da habe ich ziemlich viel ziemlich viel herumtüfteln müssen und ich denke mal, dass geht auch ein bisschen auf die Messgenauigkeit, dass ich da halt so- so ein ja irgendwie so einen Mittelweg gewählt habe, dass beides so ungefähr drauf ist.” (Interview B3, Z. 293-303)

- ”Ich glaube, das das würde ganz gut klappen (...). Also klar wie gerade gesagt, müsste man wahrscheinlich bei der Genauigkeit ein paar Abstriche machen, aber ich denke mal dadurch, dass es ein sehr offenes System ist, wo man- wo man auch für neue Aufgaben das irgendwie anpassen könnte oder so, wenn es wenn es nötig ist oder so was. Ich denke mal, das würde sehr gut klappen.” (Interview B3, Z. 326-330)
- ”Ja, ich habe ja die (...) die also die Fehler habe ich ja auch berechnet in der Arbeit und er ist schon teilweise ziemlich groß, was ich auch nachvollziehen kann, weil ich vor allem nicht- einer Sache der ich vor allem nicht vertraue sind die Winkel, die ich gemessen habe, weil das fand ich an dem Gitter immer recht schwierig war die die Winkel richtig zu messen.” (Interview B2, Z. 216-220)
- ”Was- was sich bei einem kommerziell erhältlichen Gerät mehr vertraue, als dem Spektrometer, ist die von mir vorgenommene Einstellung, die ja höchstwahrscheinlich bei den meisten kommerziellen Geräten erst mal erstmal entweder geringer ist, es gibt nicht so viele Möglichkeiten etwas einzustellen, zum Beispiel wäre die CCD jetzt von Anfang an im Brennpunkt des zweiten Spiegels der so was und ich könnte das gar nicht erst, müsste das gar nicht erst einstellen und ja das, dem würde ich auf jeden Fall mehr vertrauen, aber ansonsten den beiden Geräten an und für sich, vielleicht sogar gleich, oder ja gleich.” (Interview B2, Z. 234-241)
- ”Würde ich mir auf jeden Fall dadurch, dass man jetzt schon so viele Stunden mit dem Spektrometer verbracht hat, auf jeden Fall zutrauen. Also ich denke- ja ich denke ich könnte jetzt auch andere Sachen, wenn beschrieben ist, wenn ich weiß, was da, was das, was ich damit machen möchte, was ich damit messen möchte, könnte ich jetzt auf jeden Fall das Spektrometer immer wieder benutzen.” (Interview B2, Z. 245-249)
- ”Also ich glaub, da liegt der größte Fehlerquelle auch vor dem Gerät und nicht im Gerät oder stellt das Gerät eine Fehlerquelle, so also ich würde mal beiden Geräten relativ gleich viel vertrauen (lacht).” (Interview B1, Z. 263-266)
- ”Ich denke das würde man jetzt schon hinkriegen, weil man hat ja jetzt tatsächlich doch schon so ein Gefühl gekriegt, wie ja so die Zusammenhänge sind- grade auch solche Sachen, wenn jetzt vielleicht nicht die Anleitung durchgelesen, warum jetzt auch solche Sachen warum darf dich das Maximum nullter Ordnung da drauf fallen oder so was. Also man

hat schon ein Gefühl gekriegt wie die Zusammenhänge sind und ich denke man könnte damit jetzt auch halbwegs sinnvoll auch andere Aufgaben lösen, also gerade so, dass mit diesen - mit der Dichtebestimmung, dass war ja schon relativ fremd für alle die das jetzt gemacht haben und ja, das hat man dann ja doch relativ gut hingekriegt, denke ich. ich denke, da könnte man ja auch andere Aufgaben mit lösen (...)." (Interview B1, 274-283)

Comparison of measuring systems (VMS) Codings (3)

- "Okay, ich glaube bei einem konventionellen Spektrometer ist natürlich- ist wahrscheinlich natürlich sehr sehr viel teurer, aber ich denke mal so- so kleine Sachen (...) wären da dann irgendwie natürlich- irgendwie besser mechanisch gelöst, weil es ist ja mit LEGO einfach teilweise nicht anders möglich. So irgendwie Spiel in irgendwelchen Sachen, oder irgendwie, dass halt, das man irgendetwas einstellt und bei mir jetzt dann." (Interview B3, Z. 177-182)
- "Ich würde sagen (...) es ist wahrscheinlich nicht so sehr genau, gerade weil man es ja vorher (...) ne, gerade weil viel Spiel in den ganzen Sachen ist, also irgendwie, ich weiß jetzt nicht, wie sich das so- so auswirkt, aber ich habe bemerkt, dass ich wenn ich vorne- zum Beispiel das mit dem Laserpointer mache dann muss der ja an eine bestimmte Stelle der CCD leuchten, und wenn ich den halt vorne- der der Laserhalter hatte ja diese Gumminöppel und wenn ich halt den Laser irgendwie mal nur irgendwie so anfasse oder ein und ausschalte oder so, dann ist da schon so viel Spiel drin, dass der halt hinten auf der CCD auf eine andere Stelle leuchtet so ungefähr. Also da waren schon ein paar Millimeter drin und ich glaube das macht es halt einigermaßen ungenau (...), weshalb ich sagen würde, dass man da schon für für wirklich (...) präzise Messungen ein gekauftes herkömmliches Spektrometer nehmen sollte glaube ich" (Interview B3, Z. 277-288)
- "Also ich denke, dass ist eigentlich auch schon für Versuche geeignet (...) ja, dass ist jetzt vielleicht nicht genau so genau ist, wie ein fertig gekauftes x 1000 Euro Spektrometer natürlich auch irgendwo (...) schon so enthalten in der ganzen Geschichte, aber ist schon ausreichend gut, denke ich." (Interview B1, Z. 238-241)

Future choice of the measurement system (ZWM) Codings (3)

- "Also man muss es wahrscheinlich schon richtig einstellen, aber das wäre ja wahrscheinlich etwas- etwas ich nenne es mal anwenderfreundlicher, obwohl das ein bisschen hart ausgedrückt ist, aber ja man müsste halt wahrscheinlich nicht selber weniger friemeln und gucken, dass alles richtig passt und so und dass man- dass man so auf das LEGO achtet und so weiter, aber um auf die Frage wieder zurück zu kommen, hm (überlegt) (...) ich bin ja jetzt auch nicht in diesem Bereich tätig, das heißt, ich müsste das eigentlich gar nicht (lacht) für mich so beantworten, weil ich bräuchte es wahrscheinlich nicht, aber ich glaube ich würde das LEGO-Spektrometer nehmen (lacht).

I: Ah okay, das war ja auch nur ein Gedankenexperiment. Also einfach nur, wo da die Präferenzen liegen.

B: Genau, einfach ein bisschen so aus dem Spieltrieb heraus (lacht).” (Interview B3, Z. 190-201)

- ”also- ich (überlegt) diese ganzen Sachen aus LEGO gebaut hat natürlich so ein gewissen (...) - aktiviert so einen gewissen Spieltrieb in den Studenten ja und es ist auch schon ziemlich cool, aber ich würde mich trotzdem wahrscheinlich für ein konventionelles Messgerät entscheiden, weil ich es immer gut finde, auch jetzt im Hinblick auf nach dem Studium, wenn man ein richtiges Messgerät schon mal gesehen hat und dann nicht irgendwie wenn man damit dann im Berufsleben zu tun hat, da völlig Ahnungslos vorsitzt, sondern man sieht das und weiß was das ist, weil man kennt das aus dem Studium, man hat damit schon gearbeitet, deswegen würde ich mich wahrscheinlich für ein konventionelles Messgerät entscheiden.” (Interview B2, Z. 138-146)
- ”Ich denke ich würde das selbst gebaute nehmen (lacht), weil ich es irgendwie doch spaßiger finde das- ja das aufzubauen und feinzustimmen als wenn man es fertig da hat und dann nur seine Messung da durchführt, ich denke so macht das schon irgendwie mehr Spaß. Kommt natürlich auch immer so ein bisschen auf das Praktikum an, wenn ich jetzt- also x mal das gleiche Gerät aufbauen würde, fände ich jetzt nicht so cool, aber wenn man jetzt so jedes mal einmal bevor hat vielleicht tatsächlich dann das fertig gekaufte benutzt, dass man erst mal selber den ganzen Kram so zusammenbaut, justiert und so was, dass man sich schon mal damit beschäftigt hat. So finde ich das eigentlich ganz gut, dass könnte ich mir schon vorstellen. Da würde ich eigentlich immer erst zum selbstgebaute tendieren glaube ich.” (Interview B1, Z. 172-181)

Trust in the data from measurement systems (VDM)

Coding (1)

- ”Im Hinblick auf die Messgenauigkeit ist Vertrauen ja immer so eine Sache, meistens wird es ja angegeben, die Messgenauigkeit (...). Normalerweise würde ich sagen, dass ein kommerziell erhältliches Gerät, dadurch, dass es- dass es von- ja hm muss ich kurz mal überlegen (5 sek). Ja vermutlich, vermutlich, wenn ich da so drüber nachdenke ist es wahrscheinlich nicht viel besser oder schlechter die Messgenauigkeit des Spektrometers an sich, [...]” (Interview B2, Z. 229-234)

Trust in the data from measurement systems (VDM) - Commercial spectrometers

Codings (2)

- ”Da ja mit so einem Ding noch nie gearbeitet habe, gehe ich jetzt erst mal ganz blauäugig davon aus, dass die ja (...) die sind ja extra konstruiert für diesen Zweck und LEGO ist ja jetzt nicht unbedingt (lacht) da für so einen Zweck konstruiert und ich denk mal die werden auch irgendwie genormt sein und irgendwie halt besonders kalibriert sein, dass die halt wirklich genau sind. Gehe ich jetzt einfach mal von aus, weil wie gesagt, ich habe ja noch nie mit so einem Ding gearbeitet ja.” (Interview B3, Z. 313-318)

- "Also ich vertraue der Sache einfach mehr, weil so mehrfaches von dem hier kostet also, wäre schlecht wenn es nicht genauer wäre (lacht), aber man kann sich natürlich immer noch wie ein Deletant anstellen, wenn man es einstellt. Also ich glaub, da liegt der größte Fehlerquelle auch vor dem Gerät und nicht im Gerät oder stellt das Gerät eine Fehlerquelle, so also ich würde mal beiden Geräten relativ gleich viel vertrauen (lacht)." (Interview B1, Z. 261-266)

Trust in the data from measurement systems (VDM) - Spektrometer build from LEGO[®]-bricks

Codings (2)

- "Ansonsten, würde ich, ist es jetzt vielleicht nichts für (...) für eine hochwissenschaftlichen für eine hochwissenschaftliche Anwendung, aber im studentischen Rahmen, im Rahmen, im Rahmen eines Praktikums auf jeden Fall ziemlich gut, also ich hab in anderen Laboren, in anderen Praktika schon glaube ich Messgeräte benutzt, die schlechtere Ergebnisse gebracht haben (lacht)" (Interview B2, Z. 220-224)
- "Ah das ist (...) schwierig zu sagen, also so die (...) man hat ja jetzt auch einige Sachen so theoretisch durchgerechnet, so gerade die lineare Dispersion, die war ja nur-beziehungsweise man hat ja auch noch Wellenlängen von den Laserpointern eingesetzt, aber so war da jetzt nicht großartig ein- #00:17:19# reine Messung einfach mit dem Ding, dass war ja schon theoretisch gerechnet und die tatsächliche Messung, die man auf der CCD dann hatte und mit den Laserpointern, dass schien schon so also tatsächlich relativ genau zu sein, also (...) was war es denn also es schien sich eher so in der dritten Stelle nach dem Komma großartig nochmal so ne Abweichung zu sein, also es scheint schon relativ genau zu sein, also es lag so alles im Bereich von einer Fehler- also im von der Ungenauigkeit die ich so angenommen hatte, also es scheint eigentlich relativ vertrauenswürdig, was also raus kommt (lacht)." (Interview B1, Z. 246-257)

B.4. Interview transcripts

B.4.1. Interviewtranskript B1

I: Dann starten wir die Aufzeichnung. Okay, die läuft.

B1: Jo

I: Also, worum geht es hier in dem Interview überhaupt? Mithilfe des Interviews möchte ich einmal natürlich das Praktikum, jetzt das online Zuhause abgelaufen ist evaluieren und natürlich auch gucken, wie gut findet Ihr das LEGO-Spektrometer, was war gut, was war schlecht und so weiter und sofort. Das ganze Interview wird aufgezeichnet, bist du damit einverstanden?

B1: Ja, ist okay.

I: Okay, prima. Dann kommen wir zum ersten Teil des Interviews und zwar einmal zur Lokalität. Und zwar ist meine allererste Frage dabei, wie hat dir das Praktikum Zuhause gefallen und was sind Gründe dafür?

B1: Das hat mir prinzipiell ganz gut gefallen, war erst ein bisschen schwierig platz zu finden für die ganze Geschichte, aber so insgesamt war es wirklich nett. Da hat man sich so normal im Physiklabor und der Uni hat man sich jetzt eigentlich nie mit dem Aufbau so beschäftigt. Es stand immer eigentlich schon fertig da, man hat dann nur noch einen Versuch durchgeführt und jetzt wo man auch die Sachen mal tatsächlich selber justieren muss dann so (...). Ja das war eigentlich schon ganz nett.

I: Ah, Okay. Welche Aspekte des Praktikums Zuhause haben dir denn im Vergleich zu vorangegangenen Praktika an der Hochschule gefallen und welche nicht?

B1: Ja, also eigentlich tatsächlich, dass man sich selber mit dem Aufbau beschäftigen muss, also dass man da tatsächlich relativ lange sitzt, sich relativ intensiv damit beschäftigt und nicht einfach nur- mehr oder weniger einmal hin, eineinhalb Stunden irgendwas macht, wieder abdampft (...) und dann einen Bericht dazu schreibt, sondern, dass man tatsächlich länger da sitzt, sich Gedanken machen muss warum hat das jetzt vielleicht beim Aufbau nicht so richtig geklappt (...) und ja, dass man da auch länger dran Zeit hat, sich damit zu beschäftigen.

I: Wenn das Ganze jetzt an der Hochschule im gleichen Rahmen hätte stattgefunden, also du hättest das Spektrometer nicht Zuhause stehen gehabt, sondern in der Hochschule, wäre es dann für dich egal gewesen wo das stattfindet?

B1: Ja, ich glaube eigentlich wäre es mir dann egal gewesen, also wenn es genau so dann auch in der Hochschule abgelaufen wäre, dass man das über das gesamte Semester begleitend gemacht hätte, dann hätte ich das eigentlich genau so gut gefunden.

I: Ah Okay. Inwiefern würdest du denn ein zukünftiges Praktikum lieber Zuhause oder lieber an der Hochschule durchführen?

- 35 B1: Oh, schwierig. Kann ich gar nicht so genau sagen, also prinzipiell in der Hochschule ist natürlich der Vorteil, dass man direkter Rücksprache halten kann, aber so Zuhause hat es mir eigentlich auf ganz gut gefallen. Also eigentlich nicht so eine richtige Vorliebe, ist mir beides gleich recht.
- I: Okay, gut das kann ja auch sein. Das heißt, wenn ich- wenn es jetzt im nächsten Semester
40 wieder, die Situation ändert sich ja wahrscheinlich nicht, wieder dazu käme und du kannst wählen zwischen Hochschule und Zuhause, was würdest du denn dann wählen, wenn du konkret dich jetzt entscheiden müsstest?
- B1: Ich glaube, dann würde ich es lieber Zuhause machen.
- I: Aus welchem Grund?
- 45 B1: (...) Ja (...). Ja ich glaube da hat man einfach so ein bisschen mehr so die Ruhe.
- I: Na gut, dann kommen wir schon zum zweiten Block und zwar jetzt zu dem Spektrometer an sich. Und zwar das ganze Spektrometer war ja, wie du auch festgestellt hast aus LEGO aufgebaut und dazu erst mal eine Frage dazu und zwar Hast du vor dem Praktikum schon Erfahrungen mit dem Aufbau von LEGO-Modellen gesammelt und sollte das der Fall sein,
50 wie würdest du deine Kenntnisse mit dem Aufbau von LEGO-Modellen bewerten?
- B1: Also die Erfahrung mit LEGO Aufbau liegt jetzt auch schon ein bisschen zurück, eher so Grundschule, aber (...) ja damals habe ich relativ viel damit gemacht, also es war jetzt nicht komplett was neues mit LEGO zu bauen, das hat an sich auch alles ganz gut geklappt (...) ja also erfahrungsgemäß erfahrener LEGO-Bastler (lacht).
- 55 I: Okay, erfahrener LEGO-Bastler. Wie ist denn der Aufbau des Spektrometers verlaufen? Gab es Probleme, könnte irgendetwas verbessert werden?
- B1: Also prinzipiell haben die Sachen ganz gut geklappt, der große Spiegel, den fand ich am problemlosesten, den konnte man einfach da einsetzen, da hatte ich mich ja beim Aufbau nur einmal bei so einem Noppel verzählt, den hatte ich glaube ich einen zu weit
60 nach vorne gebaut, da hatte ich mich beim Abzählen vertan. Ja ist mir später noch mal aufgefallen, beim durch die Anleitung gucken, was ich schwierig fand war (...) beim kleinen Spiegel einmal das nach vorne und hinten Verschieben, dass hat mich gestört, weil die Halterung, die das runter gedrückt hat auf die Rillen, also um das nach vorne und hinten zu verschieben (...), wenn man jetzt ein bisschen zu weit nach hinten gedreht hat oder so was, dann ist das gerne mal abgegangen, hat sich gelöst, dann musste man es wieder runter drücken, das fand ich so ein bisschen frickelig. Und mit den Gummibändern war vielleicht ein bisschen viel Zug auf dem (...) Teller, wo man das nach rechts und links gedreht hat, da ist dann teilweise von dem- das waren ja diese zwei beige Farben ja Kreuz-Noppel Kombinationsdinger, die da dran gemacht waren, wo dann das Zahnrad
70 dran hing und da war dann ein bisschen- weiß ich nicht, vielleicht lag es auch nur an der Anordnung, wie ich die Gummis jetzt dran gemacht habe, aber teilweise war da so ein bisschen viel Zug drauf, dass da manchmal, wenn man es zu viel oder zu weit in eine Richtung gedreht hat, dass es dann gerne mal abgesprungen ist an der einen Seite, das war dann auch wieder ein bisschen nervig das jedes mal wieder dran zu drücken, weil das

75 relativ häufig passiert einem Einstellen bis ich es dann erst mal in der richtigen Position
 hatte und der richtige Kasus-Kanktus war der Halter vom Laserpointer. Der hat mich
 wirklich extrem frustriert, weil (...) gefühlt habe ich es einfach nicht hingekriegt den so
 zu platzieren, dass er auf der LEGO-Grundplatte stand und das- den Spalt getroffen hat.
 Also so, dass er den - er hat den Spalt nie so getroffen, dass er danach noch vernünftig auf
 80 den kleinen Spiegel gekommen ist um dann eben durch das Spektrometer geschleudert zu
 werden (...) deswegen, das lief dann bei mir so ab, dass ich den mehr oder weniger nur
 so halb fest auf die Bodenplatte gedrückt habe, dann den Laserpointer so ein bisschen
 nach oben und unten gedrückt habe in diesen Gummihaltern und so was. Den fand ich
 extrem frickelig diesen Halter, da würde ich mir vielleicht auch irgendwie- ich weiß nicht,
 85 ne Überarbeitung wünschen, der Rest, der hat eigentlich ganz gut geklappt.

I: Ah okay, wie würdest du denn die Anleitung des Spektrometer bewerten?

B1: Das fand ich eigentlich alles relativ gut erklärt, da konnte ich eigentlich genau so nach
 der Anleitung die Sachen runter arbeiten da sind jetzt glaube ich nicht so großartig neue
 Fragen hinzugekommen (...) so und da ging eigentlich auch ganz gut, sodass man also
 90 auch diese Kurzanleitung, wie man das Spektrometer eben halt justiert, das war eigentlich
 schon so gut erklärt. (...) Das einzige was ich hatte ist, dass ich mehr oder weniger das
 Gitter einmal falsch herum reingesteckt hab, dass die Maxima statt seitlich eben halt
 nach oben und unten geworfen wurden (// I: Ja Okay) (...). Das hat leider auch einen
 Moment gedauert, bis ich das gerafft hatte (lacht) was das Problem war.

95 I: Okay, na gut, aber das war ja wahrscheinlich einfach zu korrigieren dann.

B1: Ja.

I: Wie würdest du denn die Handhabung der einzelnen Komponenten zum Beispiel jetzt
 Spiegelhalter oder auch Gitterhalter bewerten und war die Funktionalität der Kompo-
 nenten für die Aufgabenstellung ausreichend?

100 B1: Funktionalität war eigentlich so im Großen und Ganzen ausreichend, wie gesagt beim
 kleinen Spiegelhalter, dass dieses eine Noppending permanent abgegangen ist - oder was
 heißt permanent öfters beim Einstellen abgegangen ist, danach hat man ja nicht mehr
 daran herum gedreht, nachdem es dann einmal in einer Position war war gut, da hat
 sich auch großartig nichts verstellt, also durch die Gummibänder war das schon ausre-
 105 ichend stabil und genau. Dann eben halt ja wie gesagt auch das nach vorne und hinten
 Verschieben, dass war teilweise in bisschen problematisch (...), aber das war ja auch nur
 beim Aufbau ein Problem, der andere Spiegelhalter war komplett problemlos, da gab es
 nichts, Gitterhalter hat auch eigentlich auch anstandslos funktioniert, da gab es keine
 größeren Probleme (...). Ja der Spalt hat auch so funktioniert, wie er sollte, da gab es
 110 auch nicht so richtig viel dran, was nicht hätte funktionieren können. Ja wie gesagt der
 Laserpointerhalter, der war ein bisschen frickelig. Für die LEDs, ja das einige besser in
 diese Halterung gepasst haben als andere, dass die anderen da so ein bisschen lose drin
 lagen und dass das dann ja auch so- je nachdem mit der Intensität so ein bisschen auch
 geschwankt hat, wie die jetzt da ganz drin lag, ob die jetzt ganz durch den Spalt dann mit
 115 der maximal hellsten Stelle der LED scheint oder nicht, dass war dann auch so ein biss-
 chen frimelig gefühlt (...). Ja CCD-Halter hat auch keine Probleme bereitet, also so hat

- das schon eigentlich alles ganz gut funktioniert. Was schwierig war, was ich dann auch sein lassen hab, war mit den Glühlampen das richtig zu versuchen, weil ich irgendwie nicht kann natürlich auch an der Halterung liegen, die ich jetzt im Baumarkt bekommen habe, aber irgendwie hat das jetzt auch nicht so richtig schön funktioniert die dann so auszurichten, dass es durch den Spalt trifft und dass das LEGO nicht ab raucht. (// I: Ja) Also es war schwierig, dass irgendwie halbwegs so (...) ja zu versuchen, deswegen habe ich dann am Ende dann auch mit den LEDs begnügt, weil die so am Besten geklappt haben.
- 120
- I: Ja, aber das war ja auch dann Teil einer Aufgabe, dass ihr das ein bisschen evaluiert, welche Lichtquelle eignet sich und welche eben auch einfach nicht. Okay, wie würdest du denn die Handhabung und den Umgang mit dem LEGO-Spektrometer im Allgemeinen bewerten?
- 125
- B1: Ja Handhabung fand ich war eigentlich ganz vernünftig also nachdem es dann erst mal - also das Einstellen und so was hat natürlich ein bisschen länger gedauert, weil man es jetzt zum ersten mal gemacht hat, aber (...) das hat ganz gut funktioniert, wie gesagt Spiegel haben nicht groß herum gewackelt nachdem sie Eingestellt waren, sind sie in der richtigen Position geblieben, hat alles funktioniert. Man konnte dann auch mit dem Aufbau dann anscheinend relativ vernünftig die Versuche durchführen, also es kam überall so Messwerte raus, die schon so aussehen, als ob sie realistisch sein könnten halt so Handhabung war ganz okay.
- 130
- 135
- I: Ja okay, sehr schön, dann kommen wir zum nächsten Block und zwar jetzt so ein bisschen deine eigene Einstellung zum Spektrometer und da ganz zu Anfang erstem inwiefern hat dir die Arbeit mit dem LEGO-Spektrometer überhaupt gefallen?
- B1: Ganz gut, also fand ich gut.
- I: Kannst du vielleicht kurz beschreiben was fandest- was hast- was hat dir daran besonders Spaß gemacht und was vielleicht nicht ganz so viel.
- 140
- B1: Also Spaß hat mir auch wirklich gemacht, dass man da sich Zeit- relativ tief greifend mit dem Thema beschäftigt hat, tatsächlich mit dem Aufbau, dann mal nachgeguckt was- also Funktionsprinzip von dem Spektrometer da, das war ja auch ne Aufgabe glaube ich in Phase zwei oder drei, dass man ja die Funktion von den einzelnen Komponenten tatsächlich mal beschreiben soll, dass man sich da so Gedanken drüber machen musste (...). Ja, dass man tatsächlich auch mal ein bisschen- also dass man erst mal- also, dass man das Ding erst mal vernünftig justiert, dass man dann auch ein Versuch damit abschließend macht eben halt diese Lösungsbestimmung, die Dichtebestimmung also mir hat eigentlich so insgesamt gefallen, dass man mehr oder weniger ja einfach tatsächlich mal ein kompletten Aufbau von dem Gerät macht, das feinjustiert und Versuche damit macht, mit dem selbst eingestellten und gebauten Gerät, ja das fand ich gut daran.
- 145
- 150
- I: Könntest du dir vorstellen in einem weiterführenden Praktikum zum selben Thema weiter mit dem LEGO-Spektrometer zu arbeiten?
- 155
- B1: Ja (...) also da würde ich jetzt nicht so das Problem sehen, also (...) also wie gesagt, jetzt hat man ja schon so die Übung, jetzt weiß man wie man es wo Probleme auftreten

könnten, wie man es vernünftig feinjustiert, dass es - dass man da alle so- schon mal so ein Gefühl bekommen hat und scheint ja auch so gut zu funktionieren, dass man damit schon gerne auch was weiter messen wollen würde.

160 I: hm (bejahend). Wenn du im- also das ist jetzt ein kleines Gedankenexperiment. Wenn du in einem zukünftigen Praktikum die Möglichkeit hättest zwischen einem kommerziell erhältlichen Messsystem, das muss jetzt kein Spektrometer sein, das könnte auch irgendwas anders sein oder einem selbst gebauten LEGO-Messsystem zu wählen, für welches würdest du dich auch welchem Grund entscheiden?

165 B1: Ich denke ich würde das selbst gebaute nehmen (lacht), weil ich es irgendwie doch spaßiger finde das- ja das aufzubauen und feinzustimmen als wenn man es fertig da hat und dann nur seine Messung da durchführt, ich denke so macht das schon irgendwie mehr Spaß. Kommt natürlich auch immer so ein bisschen auf das Praktikum an, wenn ich jetzt- also x mal das gleiche Gerät aufbauen würde, fände ich jetzt nicht so cool, aber wenn man jetzt
170 so jedes mal einmal bevor hat vielleicht tatsächlich dann das fertig gekaufte benutzt, dass man erst mal selber den ganzen Kram so zusammenbaut, justiert und so was, dass man sich schon mal damit beschäftigt hat. So finde ich das eigentlich ganz gut, dass könnte ich mir schon vorstellen. Da würde ich eigentlich immer erst zum selbstgebauten tendieren glaube ich.

175 I: Ah, ja schön (lacht). Inwiefern würdest du denn Studierenden das Experimentieren mit dem LEGO-Spektrometer in zumindest einem Praktikum empfehlen?

B1: Also ich würde es schon empfehlen, gerade auch in Physik, weil (...) so die Versuche die waren bis jetzt immer relativ mau im Physikpraktikum, das waren ja so Sachen, wie so Erdbeschleunigung- also (...) #00:12:43# Erdanziehungskraft bestimmen und all
180 solche Geschichten, das waren ja einfach immer nur Magnetkügelchen oder Eisenkügelchen runter fallen lassen, das war jetzt nicht so richtig aufregend, auch bei den ganzen anderen optischen Sachen, die waren wie gesagt auch immer schon so fertig aufgebaut, da musste man sich eigentlich nicht so richtig Gedanken machen wie das Ganze tatsächlich so tiefer liegend funktioniert. So da würde ich den Leuten das schon empfehlen für Physik.

185 I: Könntest du dir denn vorstellen auch privat, abseits von Hochschulveranstaltungen mit dem LEGO-Spektrometer zu experimentieren?

B1: Oh schwierig, ich wüsste nicht, was ich in ein Spektrometer halten sollte (lacht) (...). Ja ich weiß nicht, also in der Freizeit würde ich jetzt nicht denken, dass ich damit großartig was ausmessen würde (...).

190 I: Ja okay, das ist ja auch- ist ja auch nur eine Frage gewesen (B: Ja (lacht)) deswegen. Okay, dann kommen wir schon zum letzten Block, und zwar dazu jetzt so ein bisschen auch deine eigene Meinung beziehungsweise Bezugnahme auf das Spektrometer. Inwiefern hat dir das LEGO-Spektrometer und dessen Aufbau beziehungsweise die Charakterisierung der von dir aufgebauten Komponenten dabei geholfen, dass Grundlegende Funktionsprinzip des
195 Spektrometers zu verstehen?

B1: Ich denke das hat schon geholfen, auch gerade mit (...) solchen Sachen wie der Winkeldispersion und der linearen Dispersion, wie die ganzen verschiedenen Wellenlängen da auf die

- Messfläche treffen und all solche Geschichten. Auch, dass man eben halt nochmal darüber nachdenkt, warum jetzt der Spalt ne ausreichend- ne ausreichende Breite haben muss, all
 200 solche Sachen (...). Ja also ich denke, dass hat schon geholfen das- also nachzuvollziehen warum Sachen wie sein müssen im Spektrometer auch mit der Entfernung von Spiegel zu Gitter und von dem Gitter- von dem zweiten Spiegel zur CCD all solche Sachen, dass das vernünftig scharf abgebildet wird, ich denke das hat schon geholfen, dass man sich da- also dass man das alles nachvollziehen kann wie das funktioniert.
- 205 I: Gab es denn neben diese Faktoren jetzt, die du gerade eben genannt hast auch noch andere Einflussfaktoren, die dein Verständnis maßgeblich beeinflusst haben, also so was wie zum Beispiel du hast dir noch mal irgendwie Literatur angeguckt oder du hast die Vorlesung noch mal durchgeschaut?
- B1: Ja, dass- ja vorher hätte ich wahrscheinlich nicht so viel noch in der Zusatzliteratur
 210 herumgeblättert um eben halt Herleitungen nachzugucken oder so was, hätte ich dann wahrscheinlich auch einfach mit der Formel, die dann irgendwo mal auf einer Vorlesungsseite steht gelebt und die dann einfach so angewandt, aber so, dass man sieht, woher kommt das, wie kommen die Formeln so zu Stande (...). Ja ich denke, dass ist so tieferlegend dabei hängen geblieben, dass ich das zusätzlich gemacht habe.
- 215 I: Hat dir das denn geholfen das - nochmal das Verständnis zu vertiefen für das, was da physikalisch abläuft?
- B1: Ich denke schon, ja. (...)
- I: Okay, dann wie würdest du die Tauglichkeit des von dir aufgebauten und eingestellten Spektrometers für eine Praxisanwendung allgemein bewerten? (...)
- 220 B1: Also ich denke, dass funktioniert schon ausreichend gut, also man hat ja jetzt nur so richtig- also man hat ja so die Aufnahmen für die LEDs gesehen, die sahen ja schon so ungefähr zu den Sachen aus, die man auch im Internet findet, also sah schon ausreichend genau aus, dass man damit auch andere Sachen bestimmen könnte, bei der Lösung da kam eigentlich auch was relativ realistisches raus so, auch so mit dem Vergleich zu den
 225 Anderen, dass das alles so ungefähr in der selben Größenordnung sich so abspielt, also es scheint schon vernünftig genau zu sein, also dass das- also wenn es halbwegs- gut justiert hat (lacht), dass da auch realistische Werte raus kommen. Also ich denke, dass ist eigentlich auch schon für Versuche geeignet (...) ja, dass ist jetzt vielleicht nicht genau so genau ist, wie ein fertig gekauftes x 1000 Euro Spektrometer natürlich auch irgendwo
 230 (...) schon so enthalten in der ganzen Geschichte, aber ist schon ausreichend gut, denke ich.
- I: Schön, dass du gerade schon die Messgenauigkeit auch ansprichst, da habe ich nämlich auch gerade eine Frage für dich und zwar inwiefern vertraust du eigentlich den Messdaten des von dir aufgebauten Spektrometers, insbesondere im Hinblick auf die Messgenauigkeit.
- 235 B1: (...) Ah das ist (...) schwierig zu sagen, also so die (...) man hat ja jetzt auch einige Sachen so theoretisch durchgerechnet, so gerade die lineare Dispersion, die war ja nur-beziehungsweise man hat ja auch noch Wellenlängen von den Laserpointern eingesetzt,

aber so war da jetzt nicht großartig ein- #00:17:19# reine Messung einfach mit dem Ding, dass war ja schon theoretisch gerechnet und die tatsächliche Messung, die man auf
240 der CCD dann hatte und mit den Laserpointern, dass schien schon so also tatsächlich relativ genau zu sein, also (...) was war es denn also es schien sich eher so in der dritten Stelle nach dem Komma großartig nochmal so ne Abweichung zu sein, also es scheint schon relativ genau zu sein, also es lag so alles im Bereich von einer Fehler- also im von der Ungenauigkeit die ich so angenommen hatte, also es scheint eigentlich relativ
245 vertrauenswürdig, was also herauskommt (lacht).

I: Okay, dann vielleicht da auch, weil du es gerade eben schon mal gesagt hattest. In welchem Maße vertraust du denn den Messdaten eines kommerziell erhältlichen Spektrometers in Hinblick auf seine Messgenauigkeit?

B1: Also ich vertraue der Sache einfach mehr, weil so mehrfaches von dem hier kostet also, wäre schlecht wenn es nicht genauer wäre (lacht), aber man kann sich natürlich immer
250 noch wie ein Deletant anstellen, wenn man es einstellt. Also ich glaub, da liegt der größte Fehlerquelle auch vor dem Gerät und nicht im Gerät oder stellt das Gerät eine Fehlerquelle, so also ich würde mal beiden Geräten relativ gleich viel vertrauen (lacht).

I: Okay, dann kommen wir auch schon zur letzten Frage bevor wir diese demographischen Sachen abklappern. Inwiefern traust du dir den Umgang mit dem Spektrometer bei einer
255 neuen unbekanntem Aufgabenstellung zu. Also wenn du jetzt ne neue Aufgabe von mir bekämst und ich dir auch wieder, wie bei den anderen Fragen eigentlich auch schon, nicht verraten würde wie du die Aufgabe zu lösen hast, sondern du bekommst einfach eine Aufgabenstellung, inwiefern würdest du dir das zutrauen das Ganze mit dem selbst
260 gebauten Spektrometer zu lösen?

B1: Ich denke das würde man jetzt schon hinkriegen, weil man hat ja jetzt tatsächlich doch schon so ein Gefühl gekriegt, wie ja so die Zusammenhänge sind- grade auch solche Sachen, wenn jetzt vielleicht nicht die Anleitung durchgelesen, warum jetzt auch solche Sachen warum darf dich das Maximum nullter Ordnung da drauf fallen oder so was. Also man
265 hat schon ein Gefühl gekriegt wie die Zusammenhänge sind und ich denke man könnte damit jetzt auch halbwegs sinnvoll auch andere Aufgaben lösen, also gerade so, dass mit diesen - mit der Dichtbestimmung, dass war ja schon relativ fremd für alle die das jetzt gemacht haben und ja, das hat man dann ja doch relativ gut hingekriegt, denke ich. ich denke, da könnte man ja auch andere Aufgaben mit lösen (...).

270 I: Ja, super dann kommen wir jetzt nur noch zu den ganz einfachen Fragen zum Abschluss und zwar einmal wie heißt du?

B1: B1

I: Wie alt bist du ?

B1: 23

275 I: Was studierst du?

B1: Elektrotechnik

I: Und in welchem Semester bist du aktuell?

B1: Im Vierten.

I: Okay, und wo studierst du?

280 B1: In Hagen an der FH.

I: Okay, ja dann vielen Dank, ich mache mal kurz die Aufnahme aus.

B.4.2. Interviewtranskript B2

- I: Dann zeichnen wir das ganze mal auf. Okay, die Aufzeichnung läuft. Da brauchst du dich nicht wundern, wenn ich irgendwie nach rechts gucke, das liegt daran, dass ich meinen Leitfaden hier rechts auf dem Bildschirm habe und du dann hier in der Mitte bist. Du bist frei zu sagen was auch immer du denkst, dafür ist es ja da. Okay also einmal
5 kurz vielleicht zum Interview an sich. Mithilfe diese Interviews möchte ich eben sowohl das Spektrometer Praktikum, als auch das Spektrometer System an sich evaluieren und daraus dann Schlüsse ziehen inwiefern das ganze tauglich ist. Das ganze Interview wird aufgezeichnet, bist du damit einverstanden?
- B2: Ja.
- 10 I: Okay, prima. Dann fangen wir erst mal mit ganz einfachen Fragen an und zwar ganz allgemein, wie hat dir das Praktikum Zuhause gefallen?
- B2: Eigentlich sehr gut, weil das mal was anderes war und ich das ziemlich kreativ und spannend fand.
- I: Sehr schön. Welche Aspekte des Praktikums Zuhause haben dir im Vergleich zu vorange-
15 gangenen Praktika an der Hochschule gefallen und welche nicht?
- B2: (räuspert sich) Gut gefallen hat mir, dass man sich ein bisschen mehr ausleben konnte, also man musste sich nicht jetzt strickt an einen Rahmen halten. Und konnte auch mal gucken wie das jetzt ist wenn man mit dem Spalt zum Beispiel da mal ein Blatt Papier vor hält oder zwei das war ganz cool. Was damit einher geht ist auch ein bisschen meine
20 Kritik da dran und zwar es ist natürlich ziemlich zeitintensiv, wenn man das dann alles von vorne rein machen muss und auch zum Beispiel- ja sich- ja es gab jetzt für uns nicht die Möglichkeit, wie es in den meisten anderen Praktika gab, mal ein Semester höher zu fragen, wie das denn da aussieht "Wie habt ihr zum Beispiel jetzt die lineare Dispersion hergeleitet", da hatte ich ziemliche Probleme mit oder so, sondern man musste sich alles
25 quasi from scratch erarbeiten und- ja- das- das war es ja.
- I: Okay, wenn du jetzt über das Praktikum noch mal nachdenkst inwiefern würdest du ein zukünftiges Praktikum lieber an der Hochschule durchführen oder Zuhause unabhängig davon, was das für ein Praktikum ist.
- B2: hm (bejahend) also, wenn es jetzt um den Zeitaufwand geht, würde ich die Hochschule bevorzugen, weil das ist ein eineinhalb stündiges Praktikum. Man hat im Semester sowieso
30 immer wenig Zeit, dann kommt man ins in der Hochschule kommt man ins Labor macht das eineinhalb Stunden seine Messungen, setzt sich Zuhause hin und macht die Ausarbeitung das dauert vielleicht noch mal fünf Stunden, aber das ist nicht- sieben Stunden Aufbau, zwei Stunden Abbau noch dazu. Es ist halt eher so- ja so ein extra was man
35 machen kann aber es wäre jetzt nicht was wir jetzt jedes Praktikum in jedem Fach das ganze Semester über.
- I: Ja okay, aber generell würdest du sagen, dass das vielleicht eine schöne Sache war das mal auszuprobieren oder wie würdest du das bewerten?

- 40 B2: Auf jeden Fall, war ne gute Sache- kann man auch könnte man auch öfter machen nur halt wie gesagt nicht in jedem Fach jedes Semester, sondern vielleicht ein Fach pro Semester, weil wir haben ja fünf Praktika bei uns zum Beispiel in einem Semester und das ist dann, das wäre dann ein bisschen viel glaube ich.
- I: Ja okay. gut dann kommen jetzt ein paar Fragen zum Spektrometer an sich, also jetzt von der Lokalität weg, her zum Spektrometer. Und zwar ganz allgemein erst mal. Das
45 war ja aus LEGO aufgebaut, deswegen die Frage. Hast du vor dem Praktikum schon mal Erfahrungen mit dem Aufbau von LEGO Modellen gesammelt und sollte das der Fall sein, wie würdest du deine Kenntnisse mit dem Aufbau von LEGO Modellen bewerten?
- B2: Also die Erfahrungen die ich gesammelt habe sind über 15 Jahre her, deswegen war meine
50 Kenntnis- ja sehr rudimentär als ich das Modell bekommen habe. Also ich na klar man weiß man wie LEGO-Steine aufeinander gesteckt werden und so und wie das in etwa funktionieren muss, damit das in etwa funktionieren muss damit das stabil ist. Immer auf Lücke und so, aber ansonsten keine großen Erfahrungen. War da noch ein dritter Teil der Frage habe ich den vergessen?
- I: Ne das war es soweit. Aber ich schleiß quasi an die Frage jetzt direkt an und zwar
55 bezieht sich das jetzt auf den Aufbau des Spektrometers und zwar wie ist der Aufbau des Spektrometers allgemein verlaufen, gab es Probleme dabei, könnte irgendetwas verbessert werden?
- B2: hm (bejahend) Eigentlich war ist das ziemlich gut gelaufen ich bin in der vorgegebenen
60 Zeit, das waren glaube ich sieben Stunden ne? (I1: hm (bejahend)) Bin ich bin ich recht gut durch gekommen glaube ich habe sechseinhalb oder so was gebraucht. Ja hat alles gut funktioniert. An sich der Aufbau so war so solide, also auch so, dass man also die meisten Teile waren nicht so, dass man sie angefasst hat und sie auseinander gefallen sind, also es war schon war schon nicht schlecht.
- I: Okay, könnte denn irgendetwas verbessert werden?
- 65 B2: hm (überlegt) (4 sek.) Was mir aufgefallen ist jetzt von der Stabilität des LEGO-Modells. Beim Spiegelhalter für den großen Spiegel hatte ich das Problem, dass der- ich brauchte den an einer Position, die so weit vorne war, dass- das- mit dem Aufbau so wie er war schwer zu erreichen war also es war schon an der Grenze des- wofür was gedacht war aber an sonnten war eigentlich alle in Ordnung.
- 70 I: Ah okay und wie würdest du die Anleitungen des Spektrometers bewerten? War das Ausreichend was die Anleitung dir verraten hat zum Aufbau oder hat es da auch Probleme gegeben?
- B2: Nein die Aufbauanleitung war ziemlich gut. Ja die war Ausbauanleitung war sehr gut, sehr ausführlich
- 75 I: Ah Okay, wie würdest du denn die Handhabung der einzelnen Komponenten wie jetzt zum Beispiel die Spiegelhalter oder der CCD-Halter bewerten? Also um vielleicht das Ganze zu spezifizieren wie war die Funktionalität der Komponenten für die- für die Aufgabenstellung, die du hattest, ausreichend?

- 80 B2: hm (bejahend) Die Funktionalität war sehr, würde ich als sehr gut bewerten also alles hat auf jeden Fall das gemacht was es sollte. War jetzt bei den meisten Teilen nur horizontal drehen und vielleicht- ach oder horizontal drehen und verschieben aber ja waren alle sehr gut.
- 85 I: Okay und dann vielleicht noch zum Abschluss in diesem ganzen Spektrometer Thema. Wie würdest du die Handhabung und den Umgang mit dem LEGO-Spektrometer allgemein bewerten? Also jetzt gar nicht auf die Komponente bezogen, sondern auf das gesamte Spektrometer.
- 90 B2: Das einzige was mich bei der Handhabung mit dem Spektrometer gestört hat war, dass es gab ja diesen Moment wo man das Spektrometer mit der weißen also zum Beispiel mit irgendeiner breitbandigeren Leuchtmittel eingestellt hat zum Beispiel mit der weiß markierten LED habe ich das gemacht. Dann hatte man sozusagen das Spektrum drauf und dann sollte man mit den Laserpointern gucken wie- wo die jetzt diese Wellenlängen auf der CCD jetzt landen. Das fand ich ziemlich schwierig den Laserpointer da so oder die Laserpointer so hin zu bekommen, dass die dann wirklich auch die CCD treffen und ja ich glaube das hatte auch irgendwer schon im Seminar angemerkt, da hat war dann auch recht viel Spiel dann wenn man das getroffen hat, weil man sowieso so ne unnatürliche Position des Laserpointers haben musste. Ja, das ist das man da ein bisschen Spiel hatte. Aber ansonsten alles gut, das ist das Einzige, was ich zu bemängeln habe.
- 95 I: Ja gut sehr schön. Dann kommen wir jetzt von dem Spektrometer allgemein zu deiner eigenen Position zum Spektrometer und zwar erst mal wieder etwas allgemeiner. Inwiefern hat die Arbeit mit dem LEGO-Spektrometer gefallen?
- 100 B2: Ziemlich gut, ja ich fand sehr sehr interessant, was wir gemacht haben.
- I: Könntest du das ein bisschen weiter Ausführen, was hat dir daran gefallen und was nicht? (B1: Klar) Oder wenn dir nicht nichts gefallen hat.
- 105 B2: (überlegt) genau also, ich fand es gut, dass wir erst mal ziemlich allgemein darauf eingegangen sind, jetzt die Justierschraube um eine Umdrehung drehen, damit man mal ein Gefühl dafür bekommt. Dann die Winkeldispersion und die lineare Dispersion, dass man das gemacht hat, hat mir auch ziemlich gut gefallen, weil dann bekommt man finde ich ein sehr tiefes Verständnis dafür, weil in der Vorlesung bei Herrn B., der erzählt einem das zwar, aber der klickt da durch seine und da ist vielleicht ein kleines Bild und da geht ein Strahl auf irgendein Gitter drauf und da kommen bunte Strahlen raus aus dem Bild, aber das man da so ein richtiges Gefühl für bekommt, dass habe ich auf jeden Fall durch das Spektrometer bekommen, das fand ich ziemlich gut. Und und ich fand es sehr Interessant den- also obwohl das ja nicht das ist, was wir studieren diesen chemischen Aspekt mit der Bestimmung der Konzentration der Lösung das hat mir auch ziemlich gut gefallen, weil das mal auch mal ne praktische Anwendung ist. Ja also das wäre ja tatsächlich was, wenn man jetzt sich auf Optik spezialisieren würde und man käme irgendwo in ein Unternehmen, wo die sagen würden "Hier ist also unser Spektrometer ist jetzt nicht aus LEGO aber hier ist unser Spektrometer und wir müssen da jetzt eine Konzentration" bestimmen wo man sich vorstellen kann, dass das ein richtiger Anwendungsfall ist.
- 110
- 115

- 120 I: Ja cool. Könntest du dir den vorstellen, in einem weiterführenden Praktikum zum selben Thema weiter mit dem LEGO-Spektrometer zu arbeiten?
- B2: Ja, allerdings müsste ich es dann ja noch mal aufbauen, das wäre ja total doof (lacht). Nein doch klar.
- I: Also unter der Voraussetzung meinerseits, dass es schon aufgebaut wäre?
- 125 B2: Ne ja, doch klar.
- I: Okay, wenn du jetzt in einem zukünftigen Praktikum die Möglichkeit hättest, zwischen einem kommerziell erhältlichen Messsystem, muss jetzt gar nicht auf das Spektrometer bezogen sein, sondern ganz allgemein oder einem selbst gebauten LEGO-Messsystem, zu wählen. Aus welchen Gründen würdest du die wie entscheiden? Dabei kann man dahin
130 gestellt sein, ob das Spektrometer schon aufgebaut oder das Messsystem schon aufgebaut ist oder nicht, sondern es geht einfach nur um die reine Handhabung des Messsystems.
- B2: Ja, also- ich (überlegt) diese ganzen Sachen aus LEGO gebaut hat natürlich so ein gewissen (...) - aktiviert so einen gewissen Spieltrieb in den Studenten ja und es ist auch schon ziemlich cool, aber ich würde mich trotzdem wahrscheinlich für ein konventionelles Messgerät
135 entscheiden, weil ich es immer gut finde, auch jetzt im Hinblick auf nach dem Studium, wenn man ein richtiges Messgerät schon mal gesehen hat und dann nicht irgendwie wenn man damit dann im Berufsleben zu tun hat, da völlig Ahnungslos vorsitzt, sondern man sieht das und weiß was das ist, weil man kennt das aus dem Studium, man hat damit schon gearbeitet, deswegen würde ich mich wahrscheinlich für ein konventionelles Mess-
140 gerät entscheiden.
- I: Okay, inwiefern würdest du denn Studierenden das Experimentieren mit LEGO-Spektrometer in zumindest einem Praktikum empfehlen?
- B2: Zu 100 Prozent.
- I: Aus welchen Gründen?
- 145 B2: Ja einfach aus den genannten Gründen, die ich gerade schon angesagt habe, weil man es, es gibt einem einen wesentlich tieferen Einblick in das Verständnis, wie das jetzt alles mit der- mit Dispersion also mit Wellenlängenabhängigkeiten und so was, wie das alles funktioniert. Und auch mit auch mit diesen Gittern, das war zum Beispiel ne Sache die mir vorher nicht so eingeleuchtet ist und das ist das habe ich nach dem Versuch auf jeden
150 Fall viel besser verstanden.
- I: Was genau dabei?
- B2: Ja im Endeffekt ist ja so nen Gitter sind erst mal nur so ein paar Linien. Irgendwie angeordnet in einem gewissen Abstand, wenn man da Licht drauf oder scheinen lässt, dass das dann dispersiv reflektiert wird, das ist einem ja vielleicht nicht immer so also
155 so- ich hatte da nicht so 100 prozentig den Zugang vorher, dass ich das, dass das so funktioniert. Da dachte ich, ja okay das kann vielleicht funktionieren, da gibt es dann ganz spezielle Gitter oder so und dann hatte ich die hatte das Spektrometer hier und du

- sagst, ja schneide das einfach eben mit der, von der CD was aus und dann funktioniert das Ding schon ja (lacht), also das war, das fand ich ziemlich anschaulich und eindrucksvoll.
- 160 I: Ja richtig cool. Könntest du dir vorstellen privat, auch abseits von Hochschulveranstaltungen mit dem LEGO-Spektrometer zu experimentieren? Und sollte das der Fall sein oder auch nicht der Fall sein, was wären die Gründe dafür?
- B2: Also ein Grund der natürlich stark immer dagegen spricht, ist halt die Zeit, weil- ja vor allem jetzt- wir haben seit drei Wochen vorlesungsfreie Zeit, ich hatte noch keinen
165 freien Tag und vor allem jetzt in diesem Corona-Semester halt, aber ansonsten natürlich, also- Optik ist jetzt bei mir nicht das Fach, was mich von meinem Studium am meisten interessiert, aber ich- wenn bei Studenten, bei den das so ist auf jeden Fall. Klar, wenn die sich weiter damit beschäftigen wollen. Klar.
- I: Okay, dann kommen wir schon zum vorletzten Block diese Interviews, und zwar, jetzt
170 natürlich noch mal aufs Spektrometer, das ist schließlich das Thema, und zwar ist jetzt die Frage, inwiefern hat dir das LEGO-Spektrometer und dessen Aufbau beziehungsweise die Charakterisierung der einzelnen Komponenten dabei geholfen das Funktionsprinzip, das grundlegende Funktionsprinzip des Spektrometers zu verstehen?
- B2: Hab ich ja glaube ich gerade schon so ein bisschen angesprochen, also auf jeden Fall sehr
175 sehr sehr gut, weil auch dadurch, dass man zum Beispiel irgendwann war, war ne Frage mit einem selbst gewählten Experiment. Auch wenn man selbst jetzt nicht direkt auf ein Experiment kommt, erst mal probiert man rum, dann googelt man vielleicht oder guckt irgendwie anders in Literatur und allein dadurch beschäftigt man sich schon so mit Spektrometern, dass das auf jeden Fall sehr gut geholfen hat.
- 180 I: Gab es vielleicht auch noch andere Faktoren, jetzt abseits von dem Aufbau oder der Charakterisierung der Komponenten des Spektrometers, die dir geholfen haben oder die maßgeblich dafür verantwortlich waren, dass du das Spektrometer oder das Funktionsprinzip des Spektrometers verstanden hast?
- B2: Ja, also da muss ich auf jeden Fall sagen ziemlich- ziemlich- ziemlich eindrucksvoll fand
185 ich das mit der CD, dass das einfach mit der CD als Gitter funktioniert hat ja. Also das hat mir auf jeden Fall schon ein erweitertes Verständnis gebracht.
- I: Ja okay, wie würdest du denn die Tauglichkeit des von dir aufgebauten Spektrometers, beziehungsweise von dir aufgebauten, von dir eingestellten Spektrometers für eine Praxisanwendung bewerten. Allgemein, dass kann natürlich jetzt im Praktikumsexperiment
190 sein, aber auch für andere Praxisanwendungen.
- B2: Also für die Praxisanwendung der Konzentrationsbestimmung, habe ich ohne großen Aufwand- also ohne, dass ich jetzt Sachen vier, fünf, sechs mal messen musste, bevor es richtig gepasst hat, ziemlich gute Ergebnisse bekommen, die also ich weiß natürlich bis
195 jetzt noch nicht, ob sie ziemlich gut sind, aber sie stimmen einigermaßen gut mit dem überein, was ich aus dem vorherigen Aufgabenteil da auch raus hatte, also sogar ziemlich genau. Deswegen würde ich sagen dafür ist es ziemlich gut. Wie gesagt wenn es darum geht einzelne Wellenlängen jetzt da die Laserpointer auf die CCD zu bekommen oder so,

- 200 dass ist eher eine Fummelarbeit, wo man ein bisschen mehr Zeit investieren muss. Ja aber diese- also alles was sagen wir übers komplette Spektrum über die komplette Bandbreite der CCD geht, dass das könnte ich auf jeden Fall empfehlen, dass war ziemlich gut, ja ziemlich gut beurteilen.
- I: Meinst du, dass mit einem optimierten Aufbau, jetzt meinetwegen für die Halterung der Laserpointer das besser machbar wäre die Laserpointer vernünftig in das Spektrometer rein zuhalten?
- 205 B2: Ich denke schon, ja- auf jeden Fall.
- I: Okay, inwiefern vertraust du denn den Messdaten des von dir aufgebauten Spektrometers, insbesondere im Hinblick auf die Messgenauigkeit.
- B2: Ja, ich habe ja die (...) die also die Fehler habe ich ja auch berechnet in der Arbeit und er ist schon teilweise ziemlich groß, was ich auch nachvollziehen kann, weil ich vor allem nicht- einer Sache der ich vor allem nicht vertraue sind die Winkel, die ich gemessen habe, weil das fand ich an dem Gitter immer recht schwierig war die die Winkel richtig zu messen. Ansonsten, würde ich, ist es jetzt vielleicht nichts für (...) für eine hochwissenschaftlichen für eine hochwissenschaftliche Anwendung, aber im studentischen Rahmen, im Rahmen, im Rahmen eines Praktikums auf jeden Fall ziemlich gut, also ich hab in anderen Laboren, in anderen Praktika schon glaube ich Messgeräte benutzt, die schlechtere 210 Ergebnisse gebracht haben (lacht).
- I: Ja okay, dann drehen wir vielleicht, was die Frage angeht einfach mal kurz den Spieß um, weil du es ja gerade auch schon angesprochen hast, in welchem Maße vertraust du denn den Messdaten eines kommerziell erhältlichen Spektrometers im Hinblick auf die 220 Messgenauigkeit?
- B2: Im Hinblick auf die Messgenauigkeit ist Vertrauen ja immer so eine Sachen, meistens wird es ja angegeben, die Messgenauigkeit (...). Normalerweise würde ich sagen, dass ein ein kommerziell erhältliches gerät, dadurch, dass es- dass es von- ja hm muss ich kurz mal überlegen (5 sek.). Ja vermutlich, vermutlich, wenn ich da so drüber nachdenke ist es wahrscheinlich nicht viel besser oder schlechter die Messgenauigkeit des Spektrometers an sich, was- was sich bei einem kommerziell erhältlichen Gerät mehr vertraue, als dem Spektrometer, ist die von mir vorgenommene Einstellung, die ja höchstwahrscheinlich bei den meisten kommerziellen Geräten erst mal erstmal entweder geringer ist, es gibt nicht so viele Möglichkeiten etwas einzustellen, zum Beispiel wäre die CCD jetzt von Anfang an im Brennpunkt des zweiten Spiegels der so was und ich könnte das gar nicht erst, müsste das gar nicht erst einstellen und ja das, dem würde ich auf jeden Fall mehr vertrauen, aber ansonsten den beiden Geräten an und für sich, vielleicht sogar gleich, oder ja gleich.
- I: Okay, inwiefern traust du dir denn den Umgang mit dem Spektrometer bei einer neuen und unbekanntem Aufgabenstellung zu, wenn du jetzt noch mal eine bekämst in einem 235 anderen Praktikum zum Beispiel.
- B2: Würde ich mir auf jeden Fall dadurch, dass man jetzt schon so viele Stunden mit dem Spektrometer verbracht hat, auf jeden Fall zutrauen. Also ich denke- ja ich denke ich

- 240 könnte jetzt auch andere Sachen, wenn beschrieben ist, wenn ich weiß, was da, was das, was ich damit machen möchte, was ich damit messen möchte, könnte ich jetzt auf jeden Fall das Spektrometer immer wieder benutzen.
- I: Auch wenn du jetzt keine großartige Vorgabe bekommst, wie du das Spektrometer einzustellen hast, sondern ich sage dir einfach nur "Das ist das Ziel, du hast das Spektrometer gemacht".
- B2: Ja, könnte ich machen
- 245 I: Ja okay, sehr gut. Okay, dann sind wir jetzt auch am Ende der quasi, der Fragen zum Spektrometer angekommen. jetzt habe ich nur noch ein paar Fragen für die Statistik und zwar noch einmal wie heißt du?
- B2: B2
- I: Wie alt bist du?
- 250 B2: 25 Jahre.
- I: Was studierst du?
- B2: Bachelor Elektrotechnik FH Südwestfalen, ja.
- I: Da hast du die letzte Frage von mir auch schon beantwortet. (B: in der Fachhochschule Südwestfalen (lacht)) In welche Semester befindest du dich aktuell?
- 255 B2: Im Vierten.

B.4.3. Interviewtranskript B3

- I: Also einmal vielleicht kurz dazu was versuche ich überhaupt damit zu bezwecken. Und zwar mithilfe des Interviews soll auf der einen Seite soll das Spektrometer an sich aus LEGO evaluiert werden und auf der anderen Seite natürlich auch das Praktikum Zuhause. Wie ist so ein Praktikum Zuhause, was ist gut daran, was ist schlecht daran? Das ganze Interview wird aufgezeichnet, bist du damit einverstanden?
- 5
- B3: Ja.
- I: Okay. Das ganze Interview besteht aus vier Blöcken zum Praktikum und dann am Ende noch zu ein paar statistischen Fragen. Wir fangen im ersten Block an und zwar zur Lokalität des Praktikums. Ganz allgemein erst mal, wie hat dir das Praktikum Zuhause gefallen und was sind die Gründe dafür?
- 10
- B3: Ich würde sagen, dass Praktikum Zuhause hat mir ganz gut gefallen. Insgesamt weil es einfach mal was völlig anderes war und man mal so für sich auch irgendwie ein bisschen daran, daran herum basteln konnte irgendwie und auch vieles neues ja gelernt hat und und und so weiter. Also es hat mir insgesamt gut gefallen, aber es gäb so ein paar Punkte, die man vielleicht verbessern könnte. Soll ich die jetzt schon sagen oder?
- 15
- I: Ja, wenn du schon dabei bist, warum nicht?
- B3: Okay. Also ich fand es als wir zum Beispiel die, wir sollten ja einmal das Auflösungsvermögen der CCD mit den beiden Laserpointern messen und da fand ich es ein bisschen ich sag mal ein bisschen nervig, weil man musste dann öfter mal wechseln zwischen den Laserpointern und man konnte es nie so so einstellen, dass die quasi an ungefähr einer Stelle sind, sondern du hast, man hat immer irgendwie so ein bisschen rumgefriemelt und so weiter. Und ich fände es irgendwie cool, wenn es dafür und auch für die LEDs vielleicht bessere Halterungen gäbe. Also vielleicht irgendwas, was wo die direkt eingeklebt sind sind oder so, dass man das direkt auf das LEGO stecken kann, weil die waren doch immer sehr wackelig irgendwie da drin und deshalb war es schwierig irgendwie dann wieder genau eine Position zu treffen damit.
- 20
- 25
- I: Ja gut, aber das ist ja gut zu wissen so was. Dann welche Aspekte des Praktikums Zuhause, das bezieht sich jetzt wirklich auf das Praktikum an sich, haben dir im Vergleich zu vorangegangenen Praktikum- Praktika an der Hochschule gefallen und welche nicht und was sind die Gründe dafür?
- 30
- B3: Also (...) was mir jetzt an dem Praktikum Zuhause im Gegensatz zu Praktika an der FH gefallen haben oder auch zu anderen Praktikum- Praktika dieses Semester?
- I: Insbesondere zum Vergleich zu Praktika an der FH, aber du kannst auch gerne Vergleiche zu anderen Praktika herstellen.
- 35
- B3: Was mir gefallen hat war, dass man so ein bisschen auf jeden Fall freier ist, was die Zeitplanung angeht, weil wenn man in der FH ist, ist natürlich klar, dass man das innerhalb dieser eineinhalb Stunden, die man dann da ist, auch schaffen muss und das ist teilweise ein bisschen schwierig gewesen, wenn man da ist. Und hier hatte man das hat, dass man

sich das selber aufteilen konnte, also man hatte wenn man jetzt für einen Versuch länger
 40 gebraucht hat, war das nicht so, nicht so tragisch, sondern dann hat man halt für den
 nächsten- für den nächsten halt ein bisschen weiter weggeschoben sozusagen- und das
 fand ich sehr gut. Und auch das es relativ frei war, also nicht so machen Sie jetzt das,
 machen Sie jetzt das, machen Sie jetzt das, sondern man musste so ein bisschen selber
 auch tüfteln und gucken, wie man das jetzt am Besten misst und so weiter, allerdings hat
 45 das auch ne Kehrseite finde ich, weil einige male war es ein bisschen frustrierend, wenn
 man jetzt irgendwie sag ich mal jetzt zwei Stunden irgendwas gemessen hat und dann,
 kommt einer von den Anderen beiden und sagt: "Nö ich habe das Ergebnis" und dann
 denkt man sich so Mist (lacht) #00:03:43#. Das war dann teilweise auch- naja schöner
 wenn man, wenn man dann nun wirklich Anleitungen hat, aber insgesamt fand ich es
 50 eigentlich gut, dass man so so frei und- selber ein bisschen tüfteln musste.

I: Ja sehr schön, inwiefern würdest du denn ein zukünftiges Praktikum lieber an der Hochschule
 oder lieber Zuhause durchführen?

B3: Ach so da habe ich- würde, würde auch noch zum zum Punkt grade passen. Wenn man
 jetzt tatsächlich sich absprechen will und mit den, mit den Kommilitonen überlegt, wie die
 55 das gemacht haben, ist es sehr viel einfacher, wenn an an der Hochschule ist, weil- oder
 wenn man sich zumindest direkt sieht, weil es war sehr häufig die Situation irgendwie:
 "Wie hast du denn das und das gemacht" und "Ja ich schick dir mal ein Foto" und dann
 "Wie, da erkennt man doch gar nichts drauf" und "Dann mache ich dir hier mal ein
 Pfeil rein" und das war halt übers- übers Internet dann schon irgendwie ein bisschen, ein
 60 bisschen pelzig und wenn man halt nebeneinander sitzt, dann kann man direkt darauf
 zeigen und sagen "Hier wie hast du das denn so gemacht" und so weiter. Das ist halt
 an der Hochschule auf jeden Fall besser. Ich glaube ich würde, wenn es jetzt, wenn es
 jetzt wieder geht tatsächlich die Praktika in der Hochschule vorziehen, einfach aus diesem-
 einfach aus diesem Zusammenarbeitsaspekt, weil es halt wirklich sehr viel besser klappt,
 65 wenn man- im Praktikum hat man ja meistens dann auch- arbeitet man zu zweit und ich
 finde durch diese Ergänzung von den beiden ist es doch sehr viel einfacher das Ganze zu
 machen.

I: Inwiefern würdest du denn dann, wenn man das jetzt weiter spinnt, quasi ein Partner-
 Praktikum Zuhause eventuell dann bevorzugen? Also wenn du das Praktikum Zuhause
 70 machst, aber in einem Team von zwei oder drei Personen?

B3: Das fände ich ziemlich cool, das das wäre ziemlich nice- ja, weil- genau weil man hat
 dieses- dieses freie, dass man halt nicht diesen Zeitplan hat, dass man dann und dann
 fertig sein muss, sondern man hat es- also klar man hat eine Deadline, aber es ist ja, man
 kann sich überlegen, wann man das jetzt macht, wann es einem halt passt. Ja das fände
 75 ich- das fände ich gut ja.

I: Ja, okay cool. Dann kommen wir jetzt zu dem nächsten Frageblock, der sich rund ums
 Spektrometer dreht. Und zwar vor weg, das ganze Spektrometer war ja aus LEGO aufge-
 baut und dazu erst mal die Frage hast du vor dem Praktikum schon Erfahrungen mit
 dem Aufbau von LEGO-Modellen gesammelt und sollte das der Fall ein, wie würdest du
 80 deine Kenntnisse im Aufbau von LEGO-Modellen bewerten?

- 85 B3: Also LEGO habe ich als Kind halt gebaut, allerdings war ich nie so der LEGO- der LEGO-Typ, sondern ich habe viel mit Fischertechnik gebaut, falls dir das was sagt und da habe ich wirklich, also Jahre rein gesetzt (lacht) kann man sagen, also das habe ich wirklich, wirklich sehr viel gemacht, deshalb würde ich sagen obwohl es halt kein LEGO war, was ja schon relativ ähnlich so nach Anleitung irgendwas Aufbauen und so weiter würde ich mich da schon- schon so bezeichnen, dass ich das- dass ich da ganz gut dabei bin.
- 90 I: Okay, wie ist denn der Aufbau des Spektrometers verlaufen? Gab es Probleme, könnte irgendetwas verbessert werden oder wie würdest du die Anleitung des Spektrometers im Allgemeinen bewerten?
- 95 B3: Nö, es war ne gute Anleitung fand ich. Also alles- alles gut. Ich konnte es so aufbauen- also ich hatte jetzt glaube ich keine Probleme mit der Anleitung. (...) Doch also an einer Stelle war ne- war ne kurze Verwirrung, weil es in der Anleitung- jetzt weil ich aber nicht- muss ich jetzt eben mal ganz kurz gucken, dann kann ich dir direkt die Stelle sagen, (...) wenn dir das was bringt.
- I: Mach ruhig, dass ist alles- (...) alles kann helfen.
- 100 B3: Das war (4 sek.) ja genau beim Spalt- beim Spalt war ein Ableitungsbild, was tatsächlich so gar nicht in echt aussah und das hat ein bisschen Verwirrung gestiftet. War dann im Endeffekt nicht nicht schlimm, weil man sich schon gedacht hat hm das kann ja irgendwie so nicht passen, aber- genau beim Spalt bei der Anleitung bei Bild 23 (8 sek.). Ne das war noch ein bisschen weiter, ich guck gerade- ah ne, bei Bild 31, da ist es (5 sek.) und zwar jetzt muss ich das ja irgendwie beschreiben. Man sieht da, dass- also auf diesem Ding was da vor und zurück fährt mit dem Zahnrad dran oben drauf ist dieses komische LEGO-Teil, was es nur ein mal gibt, diese kleine Platte mit den zwei Noppeln und oben
105 diesem- dieser runden Öffnung dran (I: Ja). So und die wird da irgendwie- also man sieht da die- also bei Bild 31 die schwarzen Teile da drüber sind quasi direkt auf dem Teil und das ist in Wirklichkeit nicht so. Da ist ne Lücke Zwischen. Und das hat mich verwirrt, weil ich dachte hä muss ich das jetzt irgendwie da fest machen und dann habe ich irgendwie versucht das da fest zu machen- aber das geht auch gar nicht, also man
110 kann das tatsächlich nicht da fest machen, deshalb- das hat kurz verwirrt, aber sonst war, war nichts.
- 115 I: Ja gut, aber dass kann man dann anpassen und verbessern, sodass da die Verwirrung nicht mehr auftritt. (//B: Sonst waren die Anleitungen gut.) Okay, Wie würdest du denn die Handhabung der einzelnen Komponenten, wie zum Beispiel Spiegelhalter oder jetzt auch der Spalt, den du angesprochen hast, bewerten?
- 120 B3: Die war auch gut, also ab und zu- also beim beim kleinen Spiegel könnte man vielleicht verbessern, dass beim horizontalen verschieben- wurde der ja durch Gummis quasi wurde ja das Spiel ausgeglichen und bei mir ist es sehr häufig passiert- dadurch dass ich den auch, ich weiß jetzt nicht ob das richtig ist, aber ich habe den relativ weit nach vorne gefahren, weil bei mir dann die Ergebnisse tatsächlich besser waren. Und diese beiden Halter wo die, wo die Gummis dran waren, rechts und links die waren ja nur an einem

- 125 Block unten an der Grundplatte fest und die sind dann häufig mal abgerissen also die die LEGO-Steine und dass man da vielleicht noch mal irgendwie ne Befestigung für macht oder so, dass die ein bisschen- ein bisschen stabiler sind, aber ich weiß jetzt nicht, vielleicht habe ich auch falsch gemacht, weil ich den zu weit nach vorne gefahren habe, also dass ist mir aufgefallen.
- I: War denn den Funktionalität der Komponenten für die Aufgabenstellung ausreichend?
- B3: Ja, dass würde ich sagen, ja. Also es hat- hat gut geklappt.
- I: Okay, wie würdest du denn die Handhabung und den Umgang mit dem LEGO-Spektrometer im Allgemeinen bewerten?
- 130 B3: Auch gut, also am Anfang hatte ich ein bisschen Probleme, aber ich glaube, dass ist klar, weil ich wusste halt nicht so wirklich wie das Ganze aussehen muss und so weiter und da haben wir und auch viel untereinander angesprochen, wie das denn bei den anderen aussieht und dann hatten die anderen irgendwie schon so ein ganz schönes Spektrum, wir hatten das alle erst mal mit der weißen LED gemacht, und das Spektrum ah bei allen irgendwie ganz schön aus, nur bei mir war das irgendwie so Brei und dann haben wir halt getüftelt und so und ich hatte das irgendwie nicht so wirklich hingekriegt und dann habe ich aber. Ich hatte das vorher halt mit der CD gemacht und dann habe ich die CD durch das Gitter ersetzt und dann hat das bei mir auch auch super geklappt. Ja das Erste ist
- 135 hat so ein bisschen- bisschen frickelig bis man das dann so hinkriegt, dass das so in die richtige Richtung leuchtet und so weiter, aber das ist halt die erste Eingewöhnungsphase und dann geht dass alles eigentlich sehr gut. Also war schon- war schon gut.
- I: Okay, dann kommen wir zum nächsten Block, dass ist schon der vorletzte und zwar zu deiner eigenen Position zum Spektrometer, wie du so selber dazu stehst. Und und zwar ganz allgemein erst mal, wie hat dir überhaupt die Arbeit mit dem LEGO-Spektrometer gefallen? f
- 140 B3: Ja, hab ich ja schon gesagt, also hat mir gut gefallen, ja. Also, ja ich glaube, da habe ich schon viel zu gesagt.
- I: Ja. Okay, jetzt vielleicht so ein kleine Gedankenexperiment, könntest du dir vorstellen, in einem weiterführenden Praktikum zum selben Thema- also wieder Spektrometer, weiter mit dem LEGO-Spektrometer zu arbeiten?
- 150 B3: Ja, das könnte ich mir vorstellen. Denke ich ja. (...) Es ist halt nur immer, so ein bisschen, aber da kannst du jetzt natürlich nichts für, es ist jetzt natürlich immer, dass-dass das jetzt in den- in den Semesterferien quasi stattgefunden hat, ist natürlich- ich hatte jetzt- wir hatten jetzt letztes Semester ziemlich viel zu tun, weil halt online Semester und irgendwie die Profs kamen erst nicht so richtig- nicht so richtig aus den Puschen und haben dann alles so Richtung Ende gemacht und- aber wie gesagt, da kannst du jetzt nichts für. Und das ist halt jetzt- jetzt müssen wir das halt in den Semesterferien machen und dann kommt hat direkt wieder die Klausurenphase so ungefähr. Aber ansonsten,
- 155 wenn das ganz normal im Semester stattfinden würde, fände ich das- fände ich das gut, ja würde ich wieder machen.
- 160

- 165 I: Okay, wenn du in einem zukünftigen Praktikum die Möglichkeit hättest jetzt, zwischen einem konventionell- einem kommerziell erhältlichen Spektrometer, also eins, dass du kaufst, zu wählen oder zwischen dem LEGO-Spektrometer. Aus welchen Gründen würdest du dich für welches Spektrometer entscheiden?
- B3: Also ich habe ja noch nie mit einem konventionellen Spektrometer gearbeitet (lacht), ich weiß gar nicht wie die aussehen.
- I: Ganz unterschiedlich, also da kannst du dir an Form und Farbe fast alles vorstellen.
- 170 B3: Okay, ich glaube bei einem konventionellen Spektrometer ist natürlich- ist wahrscheinlich natürlich sehr sehr viel teurer, aber ich denke mal so- so kleine Sachen (...) wären da dann irgendwie natürlich- irgendwie besser mechanisch gelöst, weil es ist ja mit LEGO einfach teilweise nicht anders möglich. So irgendwie Spiel in irgendwelchen Sachen, oder irgendwie, dass halt, das man irgendetwas einstellt und bei mir jetzt dann. Ach so das war
175 übrigens auch noch, nicht nur beim kleinen Spiegel, dass die- dass die Gummis abgegangen sind, sondern beim großen Spiegel, war das glaube ich, da war ja diese große Zahnrad unten und da war ja die Schnecke dran diese- die das halt dreht und diese Schnecke ist halt bei mir häufiger mal abgesprungen, sodass sich das- der große Spiegel komplett wieder in eine
180 (// I: Ah okay.) andere Position zurückgesprungen ist durch die Gummis und das- so was würde halt bei einem konventionellen Spektrometer nicht passieren, also man hätte ein bisschen weniger- müsste man sich drum kümmern, dass ist alles- das es alles richtig eingestellt ist oder so, glaube ich. Also man muss es wahrscheinlich schon richtig einstellen, aber das wäre ja wahrscheinlich etwas- etwas ich nenne es mal anwendungsfreundlicher, obwohl das ein bisschen hart ausgedrückt ist, aber ja man müsste halt wahrscheinlich nicht selber weniger friemeln und gucken, dass alles richtig passt und so und dass man-
185 dass man so auf das LEGO achtet und so weiter, aber um auf die Frage wieder zurück zu kommen, hm (überlegt) (...) ich bin ja jetzt auch nicht in diesem Bericht tätig, dass heißt, ich müsste das eigentlich gar nicht (lacht) für mich so beantworten, weil ich bräuchte es wahrscheinlichen nicht, aber ich glaube ich würde das LEGO-Spektrometer nehmen (lacht).
- 190 I: Ah okay, das war ja auch nur ein Gedankenexperiment. Also einfach nur, wo da die Präferenzen liegen.
- B3: Genau, einfach ein bisschen so aus dem Spieltrieb heraus (lacht).
- I: Inwiefern würdest du denn anderen Studierenden, die jetzt noch kein Praktikum in der Art und Weise gemacht haben, das Experimentieren mit dem LEGO-Spektrometer zu
195 mindestens in einem Praktikum empfehlen?
- B3: Das- das haben wir tatsächlich schon gemacht, also viele haben ja gesagt- also viele haben es tatsächlich auch gar nicht mitbekommen, dass das mit dem- mit dem Praktikum ist, obwohl doch, da wurde eine E-Mail geschrieben, aber Herr B. hatte die- diese Anmeldefrist wo wir uns dann bei dir melden sollten hatte er irgendwie einen Tag vorher in den letzten
200 zwei Minuten seiner Vorlesung gesagt die er als Video hochlädt und einige gucken sich halt das Video gar nicht an dem Tag genau an, sondern irgendwie einen Tag später oder so und dann hatten die schon gar keine Chance sich mehr anzumelden, deshalb

haben wahrscheinlich auch nur so wenig mitgemacht, aber viele hatten auch schon im Vorhinein gesagt, ne das ist mir viel zu viel Arbeit, dass mache ich nicht. Ich schreib die Klausur, weil dieses Semester braucht man es ja auch nicht unbedingt. Und ja wir drei haben tatsächlich schon schon mit vielen gesprochen und gesagt "Ach das macht echt Spaß" und "Hättest du das mal mitgemacht" so ungefähr, weil man weiß ja nie ob man jetzt die Klausur schafft und so weiter, aber auch aus dem Aspekt raus, dass es eigentlich echt- das man viel gelernt hat und es echt viel Spaß gemacht hat. Also ich würde es auf jeden Fall weiterempfehlen.

I: Ah Okay, könntest du dir denn auch abseits von der Hochschulveranstaltung vorstellen, also privat, mit dem LEGO-Spektrometer zu experimentieren und wenn das so sein sollte, was sind die Gründe dafür, dass du das machen würdest oder auch nicht?

B3: Ich würde wahrscheinlich hier tatsächlich nein antworten, weil es jetzt nicht unbedingt so mein Gebiet ist, also ich interessiere mich für für andere Sachen (...) sehr viel mehr, aber das liegt jetzt nicht daran, dass das- dass der Versuch blöd war, oder sonst irgendetwas, sondern es ist halt einfach- es ist halt einfach nicht nicht mein Hobby Gebiet, mein mein Interessengebiet und deshalb würde ich es wahrscheinlich nicht machen.

I: Ach alles gut, dass ist ja auch nur eine reine Frage gewesen. Okay, dann kommen wir schon zum letzten Block. Und zwar jetzt die Frage inwiefern hat dir das LEGO-Spektrometer und dessen Aufbau beziehungsweise die Charakterisierung der einzelnen Komponenten dabei geholfen, das grundlegende Funktionsprinzip des Spektrometers zu verstehen?

B3: Sehr stark tatsächlich. Dadurch, dass man, wie ich ja auch schon häufig gesagt habe sich das ziemlich viel selbst erarbeiten musste und ich am Anfang tatsächlich kaum ne Ahnung hatte, also ja wir hatten es in Physik in der Vorlesung halt mal durchgesprochen, aber so so im Detail ist das dann ja nicht, also es wird einem vorgestellt hier so funktioniert ein Spektrometer und dann denkt man sich aha ja cool und dann geht es zum nächsten Thema so ungefähr ne? Und dass man halt damit jetzt mal so halt selber rumfriemeln musste und halt wirklich Aufgaben hatte, die man damit jetzt bewältigen musste und halt auch nicht so ne- so ne Schritt für Schritt Anleitung hatte musste man da schon ziemlich tief ins- ins Thema gehen und da habe ich sehr viel gelernt, das das ist schon so. Es ist ja häufig bei anderen Praktika wie wir sie jetzt in der Hochschule haben, weil man ja auch nur diese eineinhalb Stunden dafür Zeit hat, ist es halt häufig so jetzt messen Sie das und bitte messen Sie jetzt so das und ich sag mal da lernt man relativ wenig würde ich sagen, weil es halt wirklich einfach nur ein Kochrezept ist und ich würde jetzt sagen von einem wirklich eindeutigen Kochrezept lernt man jetzt auch nicht wirklich kochen (lacht). Man macht halt einfach man wirft halt irgendwie alles in einen Topf und acht halt einfach so und dann geht man wieder raus und ja und so eigentlich wirklich selber was gemacht (lacht) hat man eigentlich nicht.

I: Ah Okay, gab es denn auch noch andere Faktoren, die maßgeblich für dein Verständnis über das Funktionsprinzip des Spektrometers beigetragen haben, abseits jetzt vom Aufbau und charakterisieren des Spektrometers?

B3: hm (überlegt) Die Frage verstehe ich nicht so ganz.

- I: Also gerade eben hast du ja gesagt, der Aufbau und die Charakterisierung der Objekte
245 hat dir richtig geholfen das Ganze vernünftig zu verstehen und eventuell gab es ja auch
andere Faktoren, vielleicht hast du dir ein YouTube-Video angeguckt oder du hast die
Vorlesung noch mal durchgeschaut oder so was.
- B3: Ja ich habe tatsächlich für die- für die- für diese einzelnen Aufgaben auch- es waren ja
häufig auch Theorie Aufgaben habe ich mir die Literatur, die du mir- die du uns gegeben
250 hattest angeguckt und ja da habe ich- da habe ich viel gelernt. Ja sonst halt Internet
so, überall mal so durchgeguckt und so weiter da habe ich auch viel von mitgenommen,
aber auch viel- also sehr viel eigentlich von diesem Experimentellen Teil viel ausprobiert
und und ne so geht es nicht und dann noch mal noch mal so, ist auch häufig so meine
Herangehensweise, ich weiß jetzt nicht, ob es da- ob es so wissenschaftlich ist, aber ich
255 bin häufig eher so der Typ nicht vorher stundenlang einlesen, wie es denn geht, sondern
erst mal ausprobieren und gucken was wo es denn hin leuchtet so ungefähr und was da-
das da passiert und dann halt daraus irgendwie weitere Entscheidungen treffen, wie man
jetzt dann weiter macht.
- I: hm (bejahend). Jetzt vielleicht eine etwas spezifischere Frage zu Spektrometer und zwar
260 wie würdest du die Tauglichkeit des von dir persönlich aufgebauten Spektrometers und
auch natürlich von dir eingestellten Spektrometers für eine Praxisanwendung allgemein
bewerten?
- B3: Ich würde sagen (...) es ist wahrscheinlich nicht so sehr genau, gerade weil man es ja
vorher (...) ne, gerade weil viel Spiel in den ganzen Sachen ist, also irgendwie, ich weiß
265 jetzt nicht, wie sich das so- so auswirkt, aber ich habe bemerkt, dass ich wenn ich vorne-
zum Beispiel das mit dem Laserpointer mache dann muss der ja an eine bestimmte Stelle
der CCD leuchten, und wenn ich den halt vorne- der der Laserhalter hatte ja diese Gum-
minöppel und wenn ich halt den Laser irgendwie mal nur irgendwie so anfasse oder ein und
ausschalte oder so, dann ist da schon so viel Spiel drin, dass der halt hinten auf der CCD
270 auf eine andere Stelle leuchtet so ungefähr. Also da waren schon ein paar Millimeter drin
und ich glaube das macht es halt einigermaßen ungenau (...), weshalb ich sagen würde,
dass man da schon für für wirklich (...) präzise Messungen ein gekauftes herkömmliches
Spektrometer nehmen sollte glaube ich.
- I: Ah, es ist schön, dass du das ansprichst, es spielt quasi direkt in die nächste Frage rein
275 und zwar inwiefern vertraust du den Messdaten des von dir aufgebauten Spektrometers
insbesondere in Hinblick auf die Messgenauigkeit?
- B3: Ja genau, das das ist es halt, genau, wie das auch schon angesprochen hatte, (...) ich
wollte dazu gerade noch irgendwas sagen aber (lacht). Ja, gerade dass er halt überall
so ein bisschen Spiel drin ist und- ich habe mich relativ schwer getan damit, wir sollten
280 das ja mit den beiden Laserpointern machen und vorher mit einer Lichtquelle unserer
Wahl glaube ich. Also ich habe das mit der weißen LED gemacht, weil ich dazu halt
im Internet ein Spektrum gefunden hatte und habe mir das halt angeguckt und dann
sollte man das ja erst mit dieser weißen LED so ganz grob abschätzen was für ein- was
für ein Auflösungsbereich und so weiter man hat. Und dann habe ich das halt mit den
285 beiden Laserpointern gemacht und ich habe es tatsächlich erst- ich habe da glaube ich

zwei Stunden dran rum getüftelt gar nicht geschafft, wenn ich die die weiße LED, das Spektrum davon auf der CCD hatte und dann auch die Laserpinter gewechselt bin, dann haben die irgendwo in die Wiese geleuchtet und ich habe es tatsächlich erst gar nicht hin gekriegt, die beide- dass die beide gleichzeitig quasi auf die CCD leuchten, wenn man sie tauscht und deshalb, also da habe ich ziemlich viel ziemlich viel rumtüfteln müssen und ich denke mal, dass geht auch ein bisschen auf die Messgenauigkeit, dass ich da halt so so ein ja irgendwie so einen Mittelweg gewählt habe, dass beides so ungefähr drauf ist.

I: Dann möchte ich an die Frage direkt anschließen, und zwar jetzt quasi den Sprung machen zu kommerziell erhältlichen Spektrometern und zwar in welchem Maß vertraust du denn den Messdaten eines kommerziell erhältlichen Spektrometers im Hinblick auf die Messgenauigkeit?

B3: Da ja mit so einem Ding noch nie gearbeitet habe, gehe ich jetzt erst mal ganz blauäugig davon aus, dass die ja (...) die sind ja extra konstruiert für diesen Zweck und LEGO ist ja jetzt nicht unbedingt (lacht) da für so einen Zweck konstruiert und ich denk mal die werden auch irgendwie genormt sein und irgendwie halt besonders kalibriert sein, dass die halt wirklich genau sind. Gehe ich jetzt einfach mal von aus, weil wie gesagt, ich habe ja noch nie mit so einem Ding gearbeitet ja.

I: Ja, dann nur noch eine letzte Frage bevor wir zu den ganzen demographischen Sachen kommen. Inwiefern traust du dir den Umgang mit dem Spektrometer, also jetzt mit dem LEGO-Spektrometer, was du aufgebaut hast, bei einer neuen und unbekanntem Aufgabenstellung zu, das heißt du würdest einfach eine Aufgabenstellung bekommen, es würde dir nicht gesagt werden, wie du das umzusetzen hast, also so wie du das quasi aus dem Praktikum auch schon kennst, inwiefern würdest du dir das zutrauen?

B3: Ich glaube, das das würde ganz gut klappen (...). Also klar wie gerade gesagt, müsste man wahrscheinlich bei der Genauigkeit ein paar Abstriche machen, aber ich denke mal dadurch, dass es ein sehr offenes System ist, wo man- wo man auch für neue Aufgaben das irgendwie anpassen könnte oder so, wenn es denn es nötig ist oder so was. Ich denke mal, das würde sehr gut klappen. Also gerade da hat glaube ich das LEGO-Spektrometer einen Vorteil ich weiß allerdings nicht (lacht) ja. Bei einem normalen Spektrometer weiß ich jetzt nicht inwiefern das irgendwie modular aufgab ist oder sonst irgendwas, aber ich denke mal da bei bei wirklich neuen Aufgaben, die man noch nie- noch nie gemacht hat, wird das LEGO-Spektrometer viel- viel bringen, denke ich mal.

I: Ja, tatsächlich ist es so, dass normale Spektrometer für eine Anwendung gemacht werden, zum Beispiel Bestimmung von Konzentrationen von Lösungen und das war es. Mehr kannst du mit diesem Spektrometer auch nicht machen.

B3: Okay, ja dann hat auf jeden Fall das- das LEGO-Spektrometer einen Vorteil würde ich sagen.

I: Also es gibt sicherlich auch irgendwelche Spektrometer die man multipel einsetzen kann, aber da bist du dann auch preislich in Kategorien, die jenseits von dem sind, was man in so einem ganz normalen Praktikum zu jemandem nach Hause schicken kann.

- B3: Ja dann auf jeden Fall. Dann würde ich es auf jeden Fall sagen, dass das- dass das LEGO-Spektrometer da einen entschiedenen Vorteil hat.
- I: Ja, Okay gut, dann kommen wir jetzt zu den letzten kleinen Abschlussfragen für die Statistik, das wird natürlich im Nachhinein alles anonymisiert, das brauche ich nur jetzt
330 einmal. Magst du noch einmal sage, wie du heißt?
- B3: B3
- I: Wie alt bist du?
- B3: Ich bin 22.
- I: Was studiert du?
- 335 B3: Ich studiere Elektrotechnik.
- I: In welchem Semester befindest du dich aktuell?
- B3: Ich befinde mich im (...) (lacht) im fünften ne? Ja- ne- doch (...) warum weiß ich das jetzt gerade nicht (lacht). Ne ich bin im- weil das jetzt genau dazwischen ist (unverständlich) vierte, ja genau zweite war ein Sommersemester, vierte ja (lacht).
- 340 I: Ich studiere an der Fachhochschule Südwestfalen in Hagen.
- B3: Ja spitze, dann sind wir damit soweit durch.

B.5. Questionnaire: Pretest

10.06.22, 09:56

Druckansicht Pretest (opto-cubes) 10.06.2022, 09:56



opto-cubes → Pretest

10.06.2022, 09:56

Seite 01

Liebe Teilnehmerinnen, liebe Teilnehmer,
mit dem Ausfüllen dieses Fragebogens hilfst du uns nicht nur, das Praktikum und die verwendeten Messsysteme zu verbessern, sondern auch bei der Erforschung der Wirkung eben dieser. Es ist wichtig, dass du alle Fragen wahrheitsgemäß beantwortest.
Die Befragung findet anonym statt und die Daten werden nicht an dritte weitergegeben.
Vielen Dank für deine Teilnahme!

Für eine anonyme Zuordnung erstelle nun bitte deinen Zuordnungscode. Er besteht aus dem ersten und dritten Buchstaben des Vornamens deiner Mutter, sowie aus dem ersten und dritten Buchstaben des Vornamens deines Vaters. (Beispiel: **P**etra Müller, **G**erd Müller = **PTGR**)

Seite 02

1. Welches Geschlecht hast du?

- weiblich
 männlich
 divers

2. Wie alt bist du?

3. Was machst du beruflich?

- Schüler/in
 In Ausbildung
 Student/in
 Angestellte/r
 Beamte/r
 Selbstständig
 Arbeitslos/Arbeit suchend
 Sonstiges:

Bitte kreuze an, inwiefern du zustimmst

Ich ziehe es vor, in einem Praktikum einer strikten Anleitung Punkt für Punkt zu folgen.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

In einem Praktikum finde ich am liebsten selber einen Lösungsweg für die Aufgabenstellungen.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Eine strikte Anleitung im Praktikum schränkt mich in der Lösung der Aufgaben eher ein.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Praktika machen mir am meisten Spaß, wenn ich den Prozess der Bearbeitung der Aufgabenstellung selbst bestimmen kann.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Bitte kreuze an, inwiefern du zustimmst.

Im Umgang mit naturwissenschaftlichen Experimenten traue ich mir einiges zu.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Die Erarbeitung Naturwissenschaftlicher Themen fällt mir leicht.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Kein Mensch kann alles. Für naturwissenschaftliche Themen habe ich einfach keine Begabung.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Durch naturwissenschaftliche Experimente verstehe ich die zugrundeliegenden Zusammenhänge besser.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Für das Durchführen von naturwissenschaftlichen Experimenten habe ich einfach kein Händchen.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Bei manchen naturwissenschaftlichen Inhalten weiß ich von vornherein: „Das verstehe ich nie“.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Bitte kreuze an, inwiefern du zustimmst

Wenn ich an die Aufgaben denke, bin ich etwas beunruhigt.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Die konkreten Leistungsanforderungen lähmen mich.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Bei Experimentalaufgaben brauche ich keine Belohnung, sie machen mir auch so viel Spaß.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Ich mag Experimente mit Rätseln und Knobeleyen.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Beim Experimentieren mag ich die Rolle des Wissenschaftlers/der Wissenschaftlerin, der/die Zusammenhänge entdeckt.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Nach dem Hören des ersten Einführungsvortrages erschien mir die Aufgaben sehr interessant.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Ich glaube, der Schwierigkeit der anstehenden Aufgaben gewachsen zu sein.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Die Aufgaben sind eine richtige Herausforderung für mich.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Ich bin fest entschlossen, mich bei dieser Aufgabe sehr anzustrengen.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Wenn ich die Aufgabe schaffe, werde ich schon ein wenig stolz auf meine Tüchtigkeit sein.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Bitte kreuze an, inwiefern du zustimmst

Experimente mit Messsystemen durchzuführen, macht mir Spaß.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Wenn ich experimentiere merke ich gar nicht, wie die Zeit verfliegt.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Ich freue mich schon, darauf mit selbst gebauten Messsystemen zu arbeiten.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Ich begeistere mich für die Arbeit mit selbst gebauten Messsystemen.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Beim Experimentieren fühle ich mich glücklich und zufrieden.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

Wir möchten uns ganz herzlich für Ihre Mithilfe bedanken.

Ihre Antworten wurden gespeichert, Sie können das Browser-Fenster nun schließen.

Möchten Sie in Zukunft an interessanten und spannenden Online-Befragungen teilnehmen?

Wir würden uns sehr freuen, wenn Sie Ihre E-Mail-Adresse für das SoSci Panel anmelden und damit wissenschaftliche Forschungsprojekte unterstützen.

E-Mail:

Die Teilnahme am SoSci Panel ist freiwillig, unverbindlich und kann jederzeit widerrufen werden. Das SoSci Panel speichert Ihre E-Mail-Adresse nicht ohne Ihr Einverständnis, sendet Ihnen keine Werbung und gibt Ihre E-Mail-Adresse nicht an Dritte weiter.

Sie können das Browserfenster selbstverständlich auch schließen, ohne am SoSci Panel teilzunehmen.

B.6. Questionnaire: Posttest

10.06.22, 09:57

Druckansicht Posttest (opto-cubes) 10.06.2022, 09:57



opto-cubes → Posttest

10.06.2022, 09:57

Seite 01

Liebe Teilnehmerinnen, liebe Teilnehmer,
mit dem Ausfüllen dieses Fragebogens hilfst du uns nicht nur, das Praktikum und die verwendeten Messsysteme zu verbessern, sondern auch bei der Erforschung der Wirkung eben dieser. Es ist wichtig, dass du alle Fragen wahrheitsgemäß beantwortest.
Die Befragung findet anonym statt und die Daten werden nicht an dritte weitergegeben.
Vielen Dank für deine Teilnahme!

Für eine anonyme Zuordnung erstelle nun bitte deinen Zuordnungscode. Er besteht aus dem ersten und dritten Buchstaben des Vornamens deiner Mutter, sowie aus dem ersten und dritten Buchstaben des Vornamens deines Vaters. (Beispiel: **P**etra Müller, **G**erd Müller = **PTGR**)

Seite 02

1. Welches Geschlecht hast du?

- weiblich
 männlich
 divers

2. Wie alt bist du?

3. Was machst du beruflich?

- Schüler/in
 In Ausbildung
 Student/in
 Angestellte/r
 Beamte/r
 Selbstständig
 Arbeitslos/Arbeit suchend
 Sonstiges:

10.06.22, 09:57

Druckansicht Posttest (opto-cubes) 10.06.2022, 09:57

Seite 03

Der zeitliche Umfang des Praktikums sollte im Durchschnitt dem herkömmlicher Praktika entsprechen.

- Ja
 Nein

Seite 04

Bitte kreuze an, inwiefern du zustimmst.

Eine freie Zeiteinteilung ist für mich beim Experimentieren sehr wichtig.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Ich finde es hilfreich, wenn ich für die einzelnen Experimente eine feste Zeitvorgabe habe.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Seite 05

Bitte kreuze an, inwiefern du zustimmst

Eine strikte Anleitung im Praktikum schränkt mich in der Lösung der Aufgaben eher ein.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Praktika machen mir am meisten Spaß, wenn ich den Prozess der Bearbeitung der Aufgabenstellung selbst bestimmen kann.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Ich ziehe es vor, in einem Praktikum einer strikten Anleitung Punkt für Punkt zu folgen.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

In einem Praktikum finde ich am liebsten selber einen Lösungsweg für die Aufgabenstellungen.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

10.06.22, 09:57

Druckansicht Posttest (opto-cubes) 10.06.2022, 09:57

Seite 06**Für die Durchführung dieses Praktikums ziehe ich folgende Lokalität vor:**

- Zuhause
 Universität/Hochschule

Seite 07**Bitte kreuze an, inwiefern du zustimmst.**

Der Aufbau des Messsystems/der Messsysteme ging mir leicht von der Hand.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
------------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	----------------------------

Der Aufbau des Messsystems/der Messsysteme hat mir keine Probleme bereitet.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
------------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	----------------------------

Seite 08**Bitte kreuze an, inwiefern du zustimmst.**

Die Handhabung des Messsystems/der Messsysteme hat mir Schwierigkeiten bereitet.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
------------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	----------------------------

Ich hatte große Probleme bei der Bedienung des Messsystems/der Messsysteme.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
------------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	----------------------------

Bitte kreuze an, inwiefern du zustimmst.

Die Experimente mit dem Messsystem/den Messsystemen haben mir Spaß gemacht.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Ich freue mich darauf, wieder mit solchen Messsystemen zu experimentieren.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Die Arbeit mit den Messsystemen hat mich sehr begeistert

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Als ich mit dem Messsystem/den Messsystemen experimentiert habe, habe ich gar nicht gemerkt, wie die Zeit verfliegt.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Beim Experimentieren mit den Messsystem fühlte ich mich glücklich und zufrieden.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Bitte kreuze an, inwiefern du zustimmst

Ich habe mich bei den Aufgaben sehr angestrengt.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Wenn ich an die Aufgaben denke, bin ich etwas beunruhigt.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Nach dem Hören des Einführungsvortrages erschien mir die Aufgabe sehr interessant.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Die konkreten Leistungsanforderungen haben mich gelähmt.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Ich glaube, die gestellten Aufgaben, kann jeder schaffen.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Beim Arbeiten mit dem Messsystem/den Messsystemen mag ich die Rolle des Wissenschaftlers/der Wissenschaftlerin, der/die Zusammenhänge entdeckt.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Bei Aufgaben wie dieser brauche ich keine Belohnung, sie machen mir auch so viel Spaß.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Ich mag das Arbeiten mit solchen self-made Messsystemen.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Die Aufgaben waren eine richtige Herausforderung für mich.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Die erfolgreiche Aufgabenbearbeitung hat mich stolz gemacht.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

10.06.22, 09:57

Druckansicht Posttest (opto-cubes) 10.06.2022, 09:57

Seite 11

Bitte kreuze an, inwiefern du zustimmst.

In meiner Freizeit beschäftige ich mich auch mit den Themen die das Messsystem/die Messsysteme behandeln.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Seite 12

Bitte kreuze an, inwiefern du zustimmst.

Die Arbeit mit dem Messsystem hat mich nur verwirrt.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Das Messsystem/die Messsysteme hat/haben mir sehr geholfen, die zugrundeliegenden physikalischen Phänomene zu verstehen.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Der Aufbau des Messsystems/ der Messsysteme hat mir geholfen das Funktionsprinzip des Messsystems/ der Messsysteme zu verstehen.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Das Funktionsprinzip des Messsystems könnte ich problemlos einer dritten Person erklären.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Seit der Arbeit mit dem Messsystem/ den Messsystemen habe ich in dem Thema den Durchblick.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Bitte kreuze an, inwiefern du zustimmst.

Kein Mensch kann alles. Für solche Themen im Praktikum habe ich einfach keine Begabung.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Bei manchen naturwissenschaftlichen Inhalten weiß ich von vornherein: „Das verstehe ich nie“.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Ich traue mir im Umgang mit dem Messsystem einiges zu.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Die Erarbeitung der Praktikumsthemen fiel mir leicht.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Durch die Experimente mit dem Messsystem/den Messsystemen verstehe ich die zugrunde liegenden Zusammenhänge besser.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Für das Durchführen von naturwissenschaftlichen Experimenten habe ich einfach kein Händchen.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Bitte kreuze an, inwiefern du zustimmst.

Ich vertraue den Daten eines kommerziellen Messsystems uneingeschränkt.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Die von mir vorgenommenen Einstellungen des Messsystems können durchaus noch optimiert werden.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Die Messergebnisse des Messsystems/ der Messsysteme sind genau so gut wie die einer kommerziellen Alternative.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Die Genauigkeit des Messsystems ist verglichen mit einem gleichpreisigen kommerziell erhältlichen Messsystem schlechter.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Ich denke, dass das Messsystem für den professionellen Bereich eher ungeeignet ist.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Die größte Fehlerquelle bei der Justage des Messsystems liegt bei mir.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Ich habe das Messsystem optimal justiert.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Ein selbst gebautes Messsystem kann ja nur ungenau sein, schließlich bin ich kein Profi.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Ich bin etwas skeptisch, was die Genauigkeit des Messsystems angeht.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

Ich bin mir nicht sicher, ob ich das Messsystem gut kalibriert habe.

stimme überhaupt nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme zu	stimme voll und ganz zu
---------------------------	-----------------	----------------------	----------------	-----------	-------------------------

10.06.22, 09:57

Druckansicht Posttest (opto-cubes) 10.06.2022, 09:57

Seite 15

Ich bevorzuge die Arbeit mit self-made Messsystemen gegenüber der Arbeit mit kommerziellen Varianten.

- Nein
 Ja

Letzte Seite

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

Wir möchten uns ganz herzlich für Ihre Mithilfe bedanken.

Ihre Antworten wurden gespeichert, Sie können das Browser-Fenster nun schließen.

Möchten Sie in Zukunft an interessanten und spannenden Online-Befragungen teilnehmen?

Wir würden uns sehr freuen, wenn Sie Ihre E-Mail-Adresse für das SoSci Panel anmelden und damit wissenschaftliche Forschungsprojekte unterstützen.

E-Mail:

Die Teilnahme am SoSci Panel ist freiwillig, unverbindlich und kann jederzeit widerrufen werden. Das SoSci Panel speichert Ihre E-Mail-Adresse nicht ohne Ihr Einverständnis, sendet Ihnen keine Werbung und gibt Ihre E-Mail-Adresse nicht an Dritte weiter.

Sie können das Browserfenster selbstverständlich auch schließen, ohne am SoSci Panel teilzunehmen.

[M.Ed. Mattis Osterheider](#), Universität Osnabrück – 2021

Acknowledgments

An erster Stelle bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. Mirco Imlau für die Aufnahme in die Forschungsgruppe Ultrakurzzeitphysik sowie für die ausgezeichnete Betreuung und die interessanten Aufgabenstellungen während der gesamten Promotionszeit.

Weiterhin bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. Marco Beeken für die Begutachtung dieser Arbeit und darüber hinaus für meine Aufnahme in die Arbeitsgruppe Chemiedidaktik zu Beginn meiner Promotionszeit.

Des Weiteren bedanke ich mich bei der gesamten Forschungsgruppe für die ständige Hilfs- und Diskussionsbereitschaft sowie die anregenden Diskussionen. Besonders hervorheben möchte ich dabei Herrn Dr. Björn Bourdon und Herrn Yannic Toschke für die interessanten Diskussionen und Anregungen während der Arbeit und darüber hinaus, sowie Herrn Felix Kodde für seine ständige Diskussionsbereitschaft. Außerdem geht ein besonderer Dank an Frau Dr. Laura Vittadello und Herrn Anton Pfannstiel sowie für die Unterstützung bei der Finalisierung dieser Arbeit. Zusätzlich möchte ich mich bei Herrn Jan Kleenen, Frau Mira Hesselink, Herrn Eugen Wolf, Herrn Alexander Tessmer, Herrn Paul Nagel, Herrn Rasmus Böttcher, Herrn Sören Domke, Herrn Moritz Huesmann, Herrn Niklas Dömer, Herrn Oliver Konert, Frau Gerda Cornelsen sowie den weiteren Mitgliedern der Forschungsgruppe für die gute Zusammenarbeit bedanken.

Den Mitarbeitern der Arbeitsgruppe Chemiedidaktik danke ich für die freundliche Aufnahme und die anregenden Diskussionen zu Beginn meiner Promotionszeit.

Außerdem möchte ich mich bei Herrn Karsten Sengebusch und Herrn Jürgen Beckers der Eureka GmbH für die gute Zusammenarbeit, die anregenden Diskussionen und die schnellen Reparaturen der CCD Kameras bedanken.

Abschließend möchte ich mich ganz herzlich bei meiner Familie bedanken, die mich ausnahmslos während meines ganzen Studiums und der Promotion unterstützt haben und ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Особая благодарность моей девушке Боте за её всестороннюю поддержку в любых ситуациях, как в личной, так и в профессиональной жизни. Без неё эта работа была бы невозможна.

Erklärung über die Eigenständigkeit der erbrachten wissenschaftlichen Leistung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angaben der Quelle gekennzeichnet.

Weitere Personen waren an der inhaltlichen, materiellen Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich hierfür nicht die entgeltliche Hilfe von Vermittlungs- bzw. Beratungsdiensten (Promotionsberater oder andere Personen) in Anspruch genommen. Niemand hat von mir unmittelbar oder mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Osnabrück, 15.11.2022

Ort, Datum

Mattis Leo Volker Osterheider