pedocs
Open Access Erziehungswissenschaften

DIPF

Bauer, Anna B.

Experimentelle Kompetenz Physikstudierender. Entwicklung und erste Erprobung eines performanzorientierten Kompetenzstrukturmodells unter Nutzung qualitativer Methoden

Berlin : Logos Verlag 2023, 329 S. - (Studien zum Physik- und Chemielernen; 352) - (Dissertation, Universität Paderborn, 2023)

Quellenangabe/ Reference:
Bauer, Anna B.: Experimentelle Kompetenz Physikstudierender. Entwicklung und erste Erprobung eines performanzorientierten Kompetenzstrukturmodells unter Nutzung qualitativer Methoden. Berlin : Logos Verlag 2023, 329 S. - (Studien zum Physik- und Chemielernen; 352) - (Dissertation, Universität Paderborn, 2023) - URN: urn:nbn:de:0111-pedocs-334489 - DOI: 10.25656/01:33448; 10.30819/5625

https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0111-pedocs-334489
https://doi.org/10.25656/01:33448

in Kooperation mit / in cooperation with:

https://www.logos-verlag.de

Nutzungsbedingungen

Dieses Dokument steht unter folgender Creative Commons-Lizenz: http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de - Sie dürfen das Werk bzw. den Inhalt vervielfältigen, verbreiten und öffentlich zugänglich machen sowie Abwandlungen und Bearbeitungen des Werkes bzw. Inhaltes anfertigen, solange sie den Namen des Autors/Rechteinhabers in der von ihm festgelegten Weise nennen und die daraufhin neu entstandenen Werke bzw. Inhalte nur unter Verwendung von Lizenzbedingungen weitergeben, die mit denen dieses Lizenzvertrags identisch, vergleichbar oder kompatibel sind.
Mit der Verwendung dieses Dokuments erkennen Sie die Nutzungsbedingungen an.

Terms of use

This document is published under following Creative Commons-License: http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en - You may copy, distribute and transmit, adapt or exhibit the work or its contents in public and alter, transform, or change this work as long as you attribute the work in the manner specified by the author or licensor. New resulting works or contents must be distributed pursuant to this license or an identical or comparable license.

By using this particular document, you accept the above-stated conditions of use.

Kontakt / Contact:

peDOCS
DIPF | Leibniz-Institut für Bildungsforschung und Bildungsinformation
Informationszentrum (IZ) Bildung
E-Mail: pedocs@dipf.de
Internet: www.pedocs.de

Mitglied der Leibniz-Gemeinschaft

Studien zum Physik- und Chemielernen

M. Hopf und M. Ropohl [Hrsg.]

352

Anna B. Bauer

Experimentelle Kompetenz Physikstudierender

Entwicklung und erste Erprobung eines performanzorientierten Kompetenzstrukturmodells unter Nutzung qualitativer Methoden

λογος

Studien zum Physik- und Chemielernen

Herausgegeben von Martin Hopf, Hans Niedderer, Mathias Ropohl und Elke Sumfleth

Diese Reihe im Logos Verlag Berlin lädt Forscherinnen und Forscher ein, ihre neuen wissenschaftlichen Studien zum Physik- und Chemielernen im Kontext einer Vielzahl von bereits erschienenen Arbeiten zu quantitativen und qualitativen empirischen Untersuchungen sowie evaluativ begleiteten Konzeptionsentwicklungen zu veröffentlichen. Die in den bisherigen Studien erfassten Themen und Inhalte spiegeln das breite Spektrum der Einflussfaktoren wider, die in den Lehr- und Lernprozessen in Schule und Hochschule wirksam sind.
Die Herausgeber hoffen, mit der Förderung von Publikationen, die sich mit dem Physik- und Chemielernen befassen, einen Beitrag zur weiteren Stabilisierung der physik- und chemiedidaktischen Forschung und zur Verbesserung eines an den Ergebnissen fachdidaktischer Forschung orientierten Unterrichts in den beiden Fächern zu leisten.

Martin Hopf, Hans Niedderer, Mathias Ropohl und Elke Sumfleth

Studien zum Physik- und Chemielernen

Band 352

Anna B. Bauer

Experimentelle Kompetenz Physikstudierender

Entwicklung und erste Erprobung eines performanzorientierten Kompetenzstrukturmodells unter Nutzung qualitativer Methoden

Logos Verlag Berlin

λογος

Studien zum Physik- und Chemielernen
Martin Hopf und Mathias Ropohl [Hrsg.]

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.



© Copyright Logos Verlag Berlin GmbH 2023

Alle Rechte vorbehalten.

ISBN 978-3-8325-5625-9
ISSN 1614-8967

Logos Verlag Berlin GmbH
Georg-Knorr-Str. 4, Geb. 10
D-12681 Berlin

Tel.: +49 (0)30 / 42 85 10 90
Fax: +49 (0)30 / 42 85 10 92
https://www.logos-verlag.de

UNIVERSITÄT PADERBORN

Experimentelle Kompetenz Physikstudierender

Entwicklung und erste Erprobung eines performanzorientierten Kompetenzstrukturmodells unter Nutzung qualitativer Methoden

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades an der
Fakultät für Naturwissenschaften der Universität Paderborn

Anna Brigitte Bauer

Paderborn, 31.10.2022

Gutachter:

Prof. a. D. Dr. Peter Reinhold (Universität Paderborn)
Prof. Dr. Josef Riese (RWTH Aachen)

Für meinen Vater

Kurzzusammenfassung

Für den Erwerb fachmethodischer Fähigkeiten und Fertigkeiten stellen Laborpraktika eine der zentralen Lerngelegenheiten des Physikstudiums dar. Trotz ihrer hohen Bedeutung fehlt ein hochschulfachdidaktischer Diskurs zu einer lehr-lerntheoretischen Fundierung. Zudem wird seit Jahrzehnten ihre Lernwirksamkeit aufgrund der bestehenden didaktischen Gestaltung kritisiert, da die weit verbreiteten engmaschigen Aufgabenstellungen keine Anreize zur tiefergehenden Auseinandersetzung mit den Inhalten enthalten. Um der Diskrepanz zwischen den Zielsetzungen und den von den Lernenden erworbenen Fähigkeiten entgegenzuwirken, liegen aktuell nur sehr wenige und zudem nur punktuelle Grundlagen für eine evidenzbasierte Überarbeitung dieses Veranstaltungsformates vor. Eine Modellierung experimenteller Kompetenzen auf universitärem Niveau würde die fundierte Gestaltung von Laborpraktika sowie die Entwicklung von Assessment-Instrumenten ermöglichen, um so perspektivisch die Qualität der Lernumgebung zu analysieren und zu erhöhen. Ziel dieser Arbeit ist daher, einen Vorschlag für ein performanzorientiertes Kompetenzstrukturmodell auf universitärem Niveau zu entwickeln, das die Inhaltsbereiche, die experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten sowie die Qualitätsausprägungen experimenteller Handlungen systematisiert. Aufgrund der fehlenden fachdidaktischen Forschungsarbeiten sowie fehlender normativer Vorgaben wird sich der Frage danach, welche experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten, in welcher Qualitätsausprägung im Rahmen des Physikstudiums und auf welche Art und Weise erworben werden müssen, aus vier Richtungen (Wissenschaftsphilosophie, Lernwirksamkeit schulischer und universitärer Experimente sowie schulische Kompetenzmodellierung) genähert. Die Modellierung ist auf Basis der Analyse videografierter Performanz von 16 unterschiedlich fähigen Proband:innen anhand zweier unterschiedlich komplexer Aufgaben realisiert worden. Für die Entwicklung der Dimensionen Fachmethodik und Qualitätsausprägung werden unter Nutzung der qualitativen Forschungsansätze Dokumentarische Methode und Typenbildung die charakteristischen Merkmale universitären Experimentierens identifiziert und anschließend systematisiert. Die Anwendung des Modells auf alle Proband:innen zeigt, dass das Modell eine angemessene Auflösung besitzt, um Fähigkeitsunterschiede sichtbar zu machen. Die Prüfung der Güte und Geltung des Modells ist multiperspektivisch erfolgt. Zur Prüfung der Passung des Modells zur Perspektive der Wissenschaft Physik ist ein Interrating mit einem Fachwissenschaftler durchgeführt worden, das sehr gute Übereinstimmungswerte liefert. Die Passung des Modells zur Perspektive der Praktikumsleiter:innen und Betreuer:innen ist durch ein Expertenrating erfolgt, in dem die Expert:innen den vorgelegten Handlungsbeschreibungen eine Qualitätsausprägung zugeschrieben haben. Ein Rangfolgen-Vergleich zeigt hohe Übereinstimmungswerte zwischen den Qualitätsstufen des Modells und den Qualitätseinschätzungen der Expert:innen. Weiterhin scheinen die identifizierten charakteristischen Merkmale universitären Experimentierens sowie die Modellierung der experimentellen Kompetenz vor dem Hintergrund fachdidaktischer

Befunde plausibel. Insgesamt schlägt die Arbeit auf dem bisher weitgehend unerforschten Gebiet der experimentellen Kompetenz auf universitärem Niveau ein performanzorientiertes Kompetenzstrukturmodell vor, das auf Basis der hinzugezogenen Vergleichsperspektiven plausibel erscheint. Perspektivisch kann dieses Modell als Ausgangspunkt für eine tiefer gehende Analyse des universitären Experimentierens sowie schon jetzt für die Weiterentwicklung des Lehr-Lernformates Laborpraktikum genutzt werden.

Abstract

Within university physics programs, laboratory courses are one of the central learning opportunities for students to acquire and develop experimental skills and abilities. Despite their central role within physics programs, there has been only limited discourse and research on the methodical and educational foundations of laboratory courses within higher education. Furthermore, the teaching and learning structure of laboratory courses at university level has been continuously criticized over the last decades, because their typical layout is based upon detailed and stepwise experimental instructions, which offer only limited possibilities for students to develop an independent and in-depth understanding of the experimental process at university level. So far, only very limited and selective research to found an evidence-based development of laboratory courses exists. In this regard, modelling experimental competences at university level would allow for a targeted development of laboratory courses, as well as for the development of specific assessment tools, which in turn would allow to analyze and optimize the quality of the learning environment. Therefore, the goal of this study is to propose a performance-based competence structure model of experimental skills at university level, which systemizes the physics content areas, the experimental skills and abilities, as well as their quality within a unified framework. As there are no domain-specific higher education research and no normative standards, the question, how and which experimental skills and abilities should be acquired to which qualitative level in physics at university level, will be addressed from four different perspectives: from philosophy of sciences, from modeling experimental competencies within high-school education, and regarding results on the learning effectiveness of experiments in school and higher education contexts. The modelling in this study is based on the filmed performance of 16 test subjects, which have been selected to cover a broad range of experimental skills and abilities. Each test subject has performed one out of two differently demanding experiments. To structure the quality dimension of experimental skills and abilities the analysis followed the documentary method and the method of generating types, which allowed identifying and qualifying the typical characteristics of experimenting at university level. Applying the developed model on the filmed performances of all 16 test subjects demonstrated that the model displays an appropriate resolution to identify differences in the experimental performances. The validity and fitting of the developed model was assessed from multiple perspectives. First, the validity with respect to the field of physics was tested via an interrating with an experimental physicist working in science, which yielded a good agreement of the rating results. Next, an expert rating assessed the fitting of the model regarding the perspective of lab course managers and lab course assistants. Here, the experts were asked to grade the performance descriptions on a scale of 1 to 5. A comparison of the rankings shows a high agreement between the quality levels of the model and the grading of the experts. Lastly, the developed model and the identified characteristics of experimenting at university level could plausibly be

related to existing physics education and competence research. In conclusion, this study proposes a performance-based competence structure model of experimental skills in the up to now rather unexplored field of physics at university level. The model appears plausible based in the context of the aforementioned perspectives. In future research, this model can serve as a foundation for an in-depth analysis of experimenting at university level, as well as it can already now be directly applied to develop and improve the design of laboratory courses at university level.

Danksagung

Meine Promotionszeit waren die lehrreichste, spannendste, kreativste und abwechslungsreichste Zeit meines bisherigen Lebens und hat entscheidende Spuren in meiner Persönlichkeitsentwicklung hinterlassen. Neben den vielfältigen Themen und Aufgaben sind es vor allem die höchst unterschiedlichen Menschen, die die Zeit für mich besonders andenkenswert und erfüllend gemacht haben. Ich kann leider nicht alle namentlich erwähnen. Deswegen möchte ich hier zu Beginn auf diesem Wege bei allen Weggefährt:innen und Freund:innen, die direkt und indirekt an meiner Promotion beteiligt waren, danken!

Als Erstes möchte ich meinem Doktorvater Peter Reinhold danken. Du hast mir auf vielfältigen Ebenen ermöglicht mich mit einem Thema, dass mich gleich zu Beginn gepackt hat und nicht mehr losließ, tief gehend auseinander zu setzen und an vielen Stellen über mich hinaus zu wachsen. Inhaltlich hast Du mir immer wichtige und hilfreiche Impulse gegeben. Du warst mir immer ein inspirierender Gesprächspartner. In der Betreuung hast Du mir immer den Freiraum gegeben mich selbst auszuprobieren und meinen eigenen Weg zu finden. Menschlich habe ich Dich immer als mitfühlend und unterstützend erlebt, was mich durch manches *Tal der Tränen* [Zitat Peter Reinhold, diverse Situationen] gebracht hat. Weiterhin hast du mir stets die für mich notwendige Sicherheit gegeben, was meine Anstellung, aber auch meine Projekte, anging. Schlussendlich habe ich durch die Gespräche mit Dir sehr viel über das System Universität, die Gestaltung und Leitung von Forschungsprojekten sowie hochschulpolitische Themen gelernt. Für all diese Aspekte und noch viel mehr möchte ich mich bei Dir von Herzen bedanken!

Zweitens danke ich Josef Riese, der sich kurzfristig bereit erklärt hat meine Dissertation als Zweitgutachter zu begleiten und für Fragen immer ansprechbar war.

Ich möchte weiterhin Marc Sacher danken. Durch Deine innovativen und kreativen Ideen wurde ich nicht nur zu meinem Dissertationsprojekt inspiriert, sondern auch dazu mich mit Lehr-Lernprozessen auf Hochschulebene auseinanderzusetzen. Ich danke Dir auch dafür, dass ich mich von Beginn an bei der Entwicklung des Paderborner Physik Praktikums 3P einbringen konnte. Auch danke ich Dir dafür, dass Du Dich immer für mich eingesetzt, mich unterstützt und mich dazu motiviert hast, mich im Bereich der akademischen Selbstverwaltung zu engagieren. Weiterhin danke ich Dir für die vielen skurrilen Momente und Geschichten, die mich immer zum Lachen gebracht haben.

Ich danke weiterhin allen Mitgliedern des Departments Physik der Universität Paderborn, die mich in den letzten Jahren immer gerne zur Arbeit kommen ließen. Besonders danke ich Dirk Reuter. Sie haben mich die letzten Jahre als

Fachvorgesetzter bei diversen Anliegen und Projekten unterstützt und hatten immer ein offenes Ohr für mich! Torsten Meier und Christof Eigner möchte ich besonders dafür danken, dass sie Teil meiner Promotionskommission sind. Ich danke weiterhin allen Professor:innen und Mitarbeiter:innen für die vielfältigen Gespräche und die hilfreiche Unterstützung in den letzten Jahren. Besonders möchte ich den Student:innen der Physik danken. Mehrere Generationen von euch haben mir ermöglicht diverse Projekte voranzubringen und erfolgreich abzuschließen. Ohne eure tatkräftige Mitwirkung und eure konstruktive Kritik wäre das nicht in dem Maße möglich gewesen.

Weiterhin möchte ich mich bei meinen Kolleg:innen aus der AG Didaktik für viele Gespräche, hilfreiche Hinweise, lustige Geschichten sowie die große Hilfsbereitschaft danken. Ich kann hier nicht alle nennen, ich hoffe jedoch, dass ihr wisst, wie dankbar ich euch bin. Zweien, David und Agnes, möchte ich jedoch besonders danken: Ihr habt mich besonders zu Beginn meiner Promotion sehr unterstützt, wart immer für mich da und ich konnte sehr viel von euch lernen!

Meinen Arbeitskolleg:innen Markus, Julia und Ralf möchte ich für die vielen unterhaltsamen Kaffeerunden, die vielfältigen Themen, die lustigen Anekdoten und die immerwährende Unterstützung in den letzten Jahren danken!

Weiterhin bedanke ich mich bei allen, die als Expert:innen und Proband:innen dieses Projekt voran gebracht haben. Auch meinen studentischen Mitarbeiter:innen, im Besonderen Leonie, Simon, Eva und Paul, möchte ich für die große Unterstützung danken. Ohne euch wäre dies nicht möglich gewesen!

Katharina Brassat danke ich für die inspirierende und erfolgreiche Zusammenarbeit. Deinem Enthusiasmus und deine Ideen haben auch heute noch (auch wenn du nicht mehr an der Universität Paderborn bist) Einfluss auf meine Projekte!

Elisabeth möchte ich besonders für das Korrekturlesen dieser Arbeit danken! Vielen Dank, dass du mich damit so sehr unterstützt hast.

Abschließend möchte ich Michael danken. Ohne dich wäre der Abschluss meiner Promotion ein schwererer Weg gewesen. Mit deinem Enthusiasmus für mein Projekt hast du mich immer wieder dazu motiviert weiterzumachen und einen Sinn in meiner Arbeit zu sehen. Mit deiner unermüdlichen Unterstützung beim Lesen der ersten Entwürfe, beim Diskutieren von Ideen und auch beim Abgleich meiner Gedanken mit der Sichtweise von Wissenschaftler:innen der Physik hast du einen erheblichen Anteil daran, dass die Arbeit so geworden ist, wie sie ist. Dafür, dass du an meiner Seite warst und bist, werde ich dir immer dankbar sein.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung 15

2. Theoretischer Teil 21
2.1. Experimentieren in der Wissenschaft 21
2.1.1. Erkenntnismethode des Experimentierens 22
2.1.2. Arten des Logischen Schließens 27
2.1.3. Experimentelle Könner:innen - Charakteristika von Expert:innen beim Lösen komplexer Probleme 31
2.1.4. Fazit 35
2.2. Experimentieren in der Schule 36
2.2.1. Ziele des Experimentierens in der Schule 36
2.2.2. Didaktische Funktion und Einbettung von Experimenten in der Schule 42
2.2.3. Lernwirksamkeit von Experimentieren in der Schule 43
2.2.4. Fazit 49
2.3. Experimentieren im Studium 50
2.3.1. Ziele von Laborpraktika 50
2.3.2. Didaktische Gestaltung und organisatorische Strukturen von Laborpraktika 56
2.3.3. Lernwirksamkeit von Laborpraktika 63
2.3.4. Fazit 66
2.4. Zwischenfazit 67
2.5. Modellierung und Messung experimenteller Kompetenz 69
2.5.1. Kompetenz und Performanz 70
2.5.2. Bestandteile und Modellierungsansätze für Kompetenzmodelle . . 74
2.5.2.1. Modellierungsaspekt 1 - Ansatz und Funktion des Modells 75
2.5.2.2. Modellierungsaspekt 2 - Auswahl der Dimensionen 78
2.5.2.3. Modellierungsaspekt 3 - Theoretische Rahmung und Differenzierung inhaltlicher und fachmethodischer Dimensionen 80
2.5.2.4. Modellierungsaspekt 4 - Theoretische Rahmung und Differenzierung der Dimension *Qualitätsausprägung* 85
2.5.3. Festlegung des Assessment-Ansatzes für die experimentelle Kompetenz auf universitärem Niveau 88
2.5.4. Fazit 92

3. Forschungsdesiderate und Entwicklungsschritte 95

4. Design der empirischen Studie 99
4.1. Untersuchungsdesign 99
4.2. Gütekriterien qualitativer Forschungsansätze 102

5. Entwicklung der Dimension *Inhaltsbereiche* 107
5.1. Entwicklungsschritt - Qualitative Inhaltsanalyse 107
5.2. Diskussion zur Angemessenheit der Dimension *Inhaltsbereiche* . . 109

6. Konstruktion der Instrumente und Durchführung der Datenerhebung 111
6.1. Konstruktion der Experimentieraufgaben 111
6.1.1. Konstruktionsprinzipien der Experimentieraufgaben 111
6.1.2. Experimentieraufgabe 1 - Niedrige Komplexität 114
6.1.3. Experimentieraufgabe 2 - Höhere Komplexität 115
6.2. Fragebogenkonstruktion 117
6.3. Erhebungssituation - Videografierte Realexperimente 118
6.4. Stichprobe 120
6.5. Diskussion zur Angemessenheit der Datenerhebung 122

7. Konstruktion der Datengrundlage 125
7.1. Konstruktion der chronologischen Fallstudien 125
7.2. Anreicherung der Fallstudien mittels Stimulated Recall Interviews 126
7.2.1. Methodik - Stimulated Recall Interviews 127
7.2.2. Gestaltung der Stimulated-Recall Leitfäden 128
7.2.3. Durchführung der Stimulated Recall Interviews 130
7.2.4. Ergebnisse der Stimulated Recall Interviews 130
7.3. Diskussion zur Angemessenheit und Passung der Datengrundlage 131

8. Datenanalysemethodik - Die dokumentarische Methode 133
8.1. Das qualitativ-rekonstruktive Verfahren der dokumentarischen Methode 134
8.2. Diskussion der Angemessenheit der Auswertungsmethodik 137

9. Ergebnisse der empirischen Studie - Vorschlag eines Kompetenzstrukturmodells 139
9.1. Charakterisierung der Stichprobe 141
9.1.1. Charakterisierende Merkmale 141
9.1.2. Exemplarische Falldarstellungen 143
9.1.2.1. Lea, die Expertin bei der komplexeren Aufgabe 2 144
9.1.2.2. Elisa, die Fortgeschrittene bei der komplexeren Aufgabe 2 148
9.1.2.3. Piet, der Anfänger bei der weniger komplexen Aufgabe 1 152
9.1.2.4. Mia, die Anfängerin bei der komplexeren Aufgabe 2 156
9.2. Erste Entwicklung der Dimension Fachmethodik 160
9.3. Entwicklung der Dimension *Qualitätsausprägung* 163
9.3.1. Vorbereitende Analysen - Charakteristische Merkmale universitären Experimentierens 165
9.3.1.1. Vorbereitende Analyse - Typische Prozessmuster 165
9.3.1.2. Vorbereitende Analyse - Herausfordernde Stellen im Experimentierprozess 169

9.3.1.3. Einfluss von Erfahrung auf das universitäre Experimentieren - Stimulated Recall Interviews . . . 172
9.3.2. Vorstellung der sinngenetischen Typenbildung . . . 177
9.3.2.1. Sinngenetische Typik 1 - Vernetzungsgrad . . . 178
9.3.2.2. Sinngenetische Typik 2 - Zielorientierung . . . 183
9.3.3. Entwicklung der Facetten der Dimension *Qualitätsausprägung* - Relationale Typenbildung . . . 190
9.3.3.1. Vorstellung der relationalen Typiken . . . 191
9.3.3.2. Anpassung der Dimension *Fachmethodik* und Identifikation handlungsorientierter Indikatoren . . . 195
9.4. Kompetenzstrukturmodell experimentelle Kompetenz . . . 200
9.5. Prüfung des Kompetenzstrukturmodells . . . 202
9.5.1. Vergleichende Analyse aller Fälle - Fähigkeitsprofile aller Proband:innen . . . 202
9.5.2. Vergleichende Analyse aller Fälle - Abgleich der Fähigkeitsprofile mit den Äußerungen in den Stimulated Recall Interviews . . . 207

10. Diskussion und Prüfung des Modells 213
10.1. Perspektive der Fachwissenschaft . . . 214
10.1.1. Methodisches Vorgehen und Rahmenbedingungen . . . 214
10.1.2. Ergebnisse des Interratings . . . 216
10.2. Expertenrating . . . 217
10.2.1. Methodische Vorgehensweise und Rahmenbedingungen . . . 218
10.2.2. Charakterisierung der Expert:innen . . . 221
10.2.3. Ergebnisse . . . 223
10.3. Einordnung der Erkenntnisse in den fachdidaktischen Diskurs . . . 226
10.3.1. Charakteristische Merkmale universitären Experimentierens . . . 226
10.3.2. Einordnung der Kompetenzmodellierung in den fachdidaktischen Diskurs . . . 237
10.4. Diskussion zur Güte und Geltung der Ergebnisse . . . 241

11. Zusammenfassung und Implikationen 247
11.1. Zusammenfassung . . . 247
11.2. Implikationen . . . 251
11.2.1. Implikationen für die Messung experimenteller Kompetenz auf universitärem Niveau . . . 252
11.2.2. Implikationen für die Weiterentwicklung von Laborpraktika . . . 256

12. Verzeichnisse 263

Literatur 265

A. Anhang 287
A.1. Qualitative Inhaltsanalyse Versuchsanleitungen - Liste Universitäten 287

A.2. Konstruierte experimentelle Aufgabenstellungen 288
A.2.1. Aufgabenstellung 1 - weniger komplex 288
A.2.2. Aufgabenstellung 2 - komplexer 289
A.3. Beispielhafte Illustration der erhobenen Daten 290
A.3.1. Beispielmaterialien - Irmgard, die Expertin bei der Aufgabe 2 . . . 290
A.3.1.1. Irmgard - Laborjournal 290
A.3.1.2. Irmgard - Screenshots Auswertungsdatei 296
A.3.1.3. Irmgard - Browserverlauf 297
A.3.1.4. Irmgard - Chronologische Fallstudie 297
A.3.2. Beispielmaterialien - Helmut, der Novize bei der Aufgabe 1 300
A.3.2.1. Helmut - Laborjournal 300
A.3.2.2. Helmut - Screenshots Auswertungsdatei 303
A.3.2.3. Helmut - Browserverlauf 304
A.3.2.4. Helmut - Chronologische Fallstudie 304
A.4. Übersicht über die Stichprobe 308
A.5. Mögliche Musterlösung zur weniger komplexen Aufgabe 1 - Horst, der Experte 310
A.6. Expertenrating - Ergebnisse 315
A.6.1. Expertenrating - Ergebnisse der Gruppenvergleiche 316
A.6.2. Expertenrating - Ergebnisse 328

1. Einleitung

Laborpraktika stellen in naturwissenschaftlichen Studiengängen neben Vorlesungen und Übungen eine der klassischen Lehr-Lernumgebungen dar. Universitäre Laborpraktika gehen in Deutschland auf Max Weber und Friedrich Kohlrausch zurück, die Student:innen[1] Ende des 19. Jahrhunderts ermöglichten, die in den Vorlesungen erlernten Inhalte in ihren privaten Experimentierkabinetten experimentell zu erleben und zu überprüfen (Hund 1987, Heinicke 2012, Westphal 1938).

Aufgrund steigender Studierendenzahlen ist ab der Mitte der 20er Jahre des 20. Jahrhunderts von Wilhelm Westphal die heute noch vorherrschende Organisationsstruktur von Laborpraktika entwickelt worden (Diemer, Baser und Jodl 1999, K. Neumann 2004,Welzel und Haller 1998, Schumacher 2007). Die Laborpraktika wurden dazu inhaltlich eng an die Vorlesungen gekoppelt (Westphal 1938, K. Neumann 2004): Die Studierenden erlernten in den Vorlesungen physikalische Phänomene und Konzepte sowie deren mathematische Modellierung. Im Rahmen der Laborpraktika konnten diese physikalischen Inhalte an ausgewählten Experimenten angewendet werden.

Physikstudent:innen belegen heutzutage typischerweise zu Beginn ihres Studiums zunächst sogenannte Anfängerlaborpraktika[2]. Anfängerlaborpraktika unterscheiden sich je nach Standort in ihrem Umfang (2-4 Veranstaltungen über mehrere Semester), ihrem Workload (typischerweise drei bis fünf ECTS) sowie in der Verankerung im Curriculum (erstes bis viertes Semester). Gemeinsam haben die Anfängerlaborpraktika die Zielsetzung, dass die Studierenden grundlegende experimentelle Fähigkeiten und Fertigkeiten erwerben sollen (Nagel, Scholz und Weber 2018) und dass sie diese in Auseinandersetzung mit Experimenten aus den standardmäßig gelehrten Grundlagenveranstaltungen (Mechanik, Elektrodynamik, Optik, Atomphysik) erlernen sollen.

Die durchzuführenden Experimente werden von sogenannten Lehrmittelfirmen an die Universitäten verkauft und sind meistens stark standardisiert, um physikalische Phänomene möglichst exakt untersuchbar zu machen. Da es zu allen Inhaltsgebieten Standardexperimente gibt, kann davon gesprochen werden, dass somit deutschlandweit quasi-kanonisierte Inhalte existieren. Weiterhin gibt es mehrere Monografien, die ausgearbeitete engmaschige Anleitungen zu den Stan-

[1] In diesem Text wird Wert auf genderneutrale Sprache gelegt. Feststehende Begrifflichkeiten, wie z. B. Experten-Novizen-Vergleich, werden hingegen nicht verändert.

[2] In diesem Projekt werden nur die Anfängerlaborpraktika, die in physikalische Studiengänge implementiert sind, betrachtet. Laborpraktika für Nebenfach- oder Lehramtsstudierende verfolgen andere Zielsetzungen und werden dementsprechend nur am Rand mitdiskutiert.

dardexperimenten beinhalten.[3] Die konkreten Aufgabenstellungen, die mit den jeweiligen Experimenten verbunden werden, variieren jedoch von Standort zu Standort bezüglich der zu erwerbenden Fähigkeiten und Fertigkeiten sowie auch hinsichtlich der Komplexität bzw. Offenheit.

Ausgehend von nationaler und internationaler fachdidaktischer Forschung zu Experimentierumgebungen in der Schule begann ab Ende der 1980er Jahre auch eine Diskussion zur Lernwirksamkeit vom Experimentieren an den Universitäten. Grundlegende Fragen waren, welche Fähigkeiten und Fertigkeiten überhaupt mit Hilfe des Experimentierens gelernt, ob diese nicht auch mit Hilfe anderer Ansätze erworben werden können (Toothacker 1983,) bzw., wie Experimentierumgebungen gestaltet sein müssen, um lernwirksam zu sein.

Zentrale Erkenntnis des Diskurses war, dass eine Diskrepanz zwischen den von den Lehrenden intendierten Lernzielen und den Lernergebnissen der Studierenden vorliegt (u. a. Toothacker 1983). Dieses Ergebnis wird von Toothacker (1983) auf drei unterschiedliche Faktoren zurückgeführt. Zum einen scheint die Kopplung von Vorlesungen und Praktika nicht zu einer höheren Lernwirksamkeit der Vorlesungen zu führen. Weiterhin scheinen Laborpraktika nicht dazu zu führen, dass Studierende ein angemessenes Bild zur Natur der Naturwissenschaft entwickeln. Schlussendlich konnten damals keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der experimentellen Fähigkeiten zwischen Studierenden mit und ohne Laborpraktikum gefunden werden. Diese Erkenntnisse wurden auf die didaktische Ausgestaltung von Laborpraktika zurückgeführt.

Auf Ebene der inhaltlichen Gestaltung der Lehr-Lernveranstaltung ist zwar anhand der Diskussion über die Zielsetzungen deutlich geworden, dass die Studierenden im Rahmen von Laborpraktika grundlegende experimentelle Fähigkeiten und Fertigkeiten erwerben sollen. Dies wird allerdings nicht systematisch in der Lehrveranstaltung angelegt. Es dominiert immer noch die Ausrichtung der Veranstaltung an physikalischen Inhalten der Vorlesung (Toothacker 1983). Auf Ebene der Aufgabengestaltung kann festgestellt werden, dass engmaschige Anleitungen für die Experimente das selbstständige Durchdenken und Entwickeln von Experimenten und damit eine tiefgehende Auseinandersetzung mit den physikalischen Phänomenen und experimentellen Möglichkeiten verhindern (Haller 1999, Ruickoldt 1996, Hucke 2000).

Zusätzlich zu den auf Basis fachdidaktischer Forschungen ermittelten Defiziten sowie den anschließenden didaktischen Weiterentwicklungen der Lehrveranstaltung

[3] Die einzelnen Monografien sind von Praktikumsleiter:innen an unterschiedlichen Standorten geschrieben worden und werden mittlerweile auch an anderen Standorten eingesetzt. Die Monografien werden regelmäßig überarbeitet und neu aufgelegt. Die erste derartige Monografie ist von Friedrich Kohlrausch 1870 veröffentlicht worden (Kohlrausch 1870). Viele der Experimente findet man auch heute noch in den Sammlungen.

Laborpraktikum hat die mit dem Bologna-Prozess verbundene Forderung nach kompetenzorientierter Lehre seit den 2000er Jahren bis heute Einfluss auf die Gestaltung und Evaluation von Laborpraktika. Bisher ist die Kompetenzorientierung "an deutschen Hochschulen [...] nur formal berücksichtigt und umgesetzt [...]" worden (Schaper u. a. 2012, S. 6). Diese Erkenntnis aus 2012 besitzt auch heute noch Gültigkeit. Daraus folgt, dass für die Studiengänge in den Prüfungsordnungen festgelegt ist, welche Kompetenzen die Studierenden, in welcher Veranstaltung erwerben sollen. Die kompetenzorientierte Gestaltung der Lehr-Lernumgebungen und der Prüfungen, mit denen der Kompetenzerwerb unterstützt und überprüft werden soll, ist jedoch noch nicht flächendeckend über alle Studiengänge geschehen. Der Wechsel zur Outcome-Orientierung und damit verbunden die Weiterentwicklung der Lehr-Lernumgebung Laborpraktikum stellt auch die Verantwortlichen für die Laborpraktika, die mehrheitlich Fachwissenschaftler:innen sind, vor große Herausforderungen.

Als Reaktion darauf sind bis heute als ein erster Schritt diverse Umfragen zu den Zielsetzungen von Laborpraktika durchgeführt worden (Nagel, Scholz und Weber 2018, Zwickl und Finkelstein 2013, Ruickoldt 1996). Konsens ist, dass Studierende in Laborpraktika grundlegende experimentelle Fähigkeiten und Fertigkeiten erwerben sowie einen Einblick in das Experiment als Erkenntnismethodik der Wissenschaft Physik erhalten sollen. Dies soll die Studierenden u. a. auf die Bewältigung der Qualifikationsarbeiten vorbereiten. Diese Zielsetzungen sind auch in der Empfehlung für die Konzeptionierung von Bachelor- und Masterstudiengängen im Fach Physik von der Konferenz der Fachbereiche Physik (Empfehlung der Konferenz der Fachbereiche Physik 2010) aufgeführt worden.

Weiterhin sind an einigen Hochschulstandorten neue didaktische Konzepte für Laborpraktika mit dem Ziel der Erhöhung der Lernwirksamkeit entstanden (u. a. Theyßen 1999, K. Neumann 2004, Schumacher 2007, Sacher und Bauer 2021) sowie unterschiedliche punktuelle Weiterentwicklungen von Konzeptbestandteilen (u. a. Nagel 2009, Dounas-Frazer und Lewandowski 2018) entwickelt, implementiert und evaluiert worden. Bezüglich der Messung studentischer, experimenteller Kompetenz ist im Projekt *KoWadis* bei Physik-Lehramtsstudierenden ein Paper-Pencil-Test basierend auf einem adaptierten Modell zu naturwissenschaftlichen Denk- und Arbeitsweisen aus dem schulischen Bereich verwendet worden (Straube 2016). Einen anderen Weg ist Heidrich am IPN in Kiel gegangen. Er hat ein performanzorientiertes Testinstrument für den Themenbereich Optik entwickelt, jedoch ist es ihm aufgrund der Diskrepanz zwischen den formulierten Zielsetzungen, die mit dem studentischen Experimentieren verbunden sind, und der gezeigten Performanz der Proband:innen damit nicht umfassend gelungen, valide Ergebnisse zu erzielen (Heidrich 2017).

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Lernwirksamkeit von universitären Laborpraktika seit mehreren Jahrzehnten kontrovers diskutiert wird. Für die deutsche

Hochschullandschaft lässt sich festhalten, dass es mittlerweile einen breiten Konsens hinsichtlich notwendiger Weiterentwicklungen der Lernumgebung sowie der grundsätzlichen Zielsetzungen für Laborpraktika gibt. Weiterhin wird deutlich, dass schon erste Konzepte entstanden sind, die die identifizierten Herausforderungen mit dem Ziel, die Lernwirksamkeit der Lehr-Lernveranstaltung zu erhöhen, teilweise adressieren.

Es wird jedoch auch deutlich, dass es auf mehreren Ebenen an einer grundlegenden didaktischen Fundierung fehlt. Anders als in der Schule, wo differenzierte kompetenzorientierte Lehrpläne die Strukturierung und Gestaltung des Physikunterrichts steuern, gibt es dies für universitäre Studiengänge nicht. Dieser Aspekt ist vor allem auf die Lehrfreiheit der Dozierenden an Universitäten zurückzuführen. Es werden zwar auf Modulebene die grundsätzlichen Lerninhalte festgelegt und diese werden auch geprüft, wenn der Studiengang akkreditiert wird, sie sind jedoch nicht auf einen Konsens, wie z. B. in der Schule durch Vorgaben aus der Kultusministerkonferenz, zurückzuführen, sondern vielmehr als tradiert anzusehen. Die Dozierenden können weiterhin innerhalb der sehr grob formulierten Modulbeschreibungen selbst entscheiden, was sie auf welche Art und Weise lehren. Steuernde Kontrollinstrumente, wie im schulischen Bereich, z. B. Vergleichsarbeiten oder Zentralprüfungen, existieren für die universitäre Ausbildung nicht.

Aufgrund der fehlenden zentralen Vorgaben und der daraus resultierenden hohen Varianz in der Gestaltung universitärer Lehre existieren bisher keine Kompetenzmodelle für die experimentelle Kompetenz für Physikstudierende. Kompetenzmodelle beschreiben und strukturieren, welche Kompetenzfacetten Lernende, in welchen Inhaltsgebieten, mit welcher Ausprägungsstufe erwerben sollen (Schecker und Parchmann 2006). Ein solches Modell würde dementsprechend einen Rahmen für die didaktische Weiterentwicklung der Lehr-Lernveranstaltung Laborpraktikum mit Fokus auf die Implementierung einer Kompetenzorientierung ermöglichen. Weiterhin würde es die Grundlage für die valide Messung bzw. Diagnose experimenteller Kompetenz Physikstudierender liefern, da damit kompetenzorientierte, standardisierte Prüfungsformate sowie Testinstrumente entwickelt werden könnten (Nagel, Scholz und Weber 2018, Heidrich 2017). Mit Hilfe standardisierter Testinstrumente könnten auch die Lernwirksamkeit unterschiedlicher didaktischer Konzeptionierungen von Laborpraktika bestimmt und auf Basis von Vergleichen unterschiedlicher Konzeptionierungen Impulse für die Weiterentwicklung des Lehr-Lernformates abgeleitet werden.

Aktuell ist dementsprechend unklar, welche physikalischen Themen, in welcher Komplexität und, unter Nutzung welcher fachmethodischen Fähigkeiten und Fertigkeiten im Rahmen von Laborpraktika gelehrt und gelernt werden sollen. Wie kann man sich diesem nun nähern? Vogelsang und Woitkowski (2017) merkten an, dass zwischen der schulbezogenen Fachdidaktik sowie der hochschulbezogenen

Didaktik zumindest "mittelbare Anschlussfähigkeit" (Vogelsang und Woitkowski 2017) bestehe, da sie gleiche Themen ((fachspezifische) Lehr-Lernprozesse, Gestaltung qualitativ hochwertiger Lehre, ...) jedoch mit unterschiedlichen Rahmenbedingungen (z. B. Zielsetzungen, Lehrverständnis, ...) adressieren würden. Dementsprechend stellt sich die Frage, wie wurde sich in Schule einem vereinheitlichten Rahmencurriculum für das Fach Physik genähert? Im Zuge der Curriculums-Forschung wurde damals zunächst eine groß angelegte mehrstufige Delphie-Studie mit Expert:innen, die unterschiedliche Perspektiven auf und eine unterschiedliche Nähe zu Bildungsprozessen besitzen (z. B. Politiker:innen, Lehrer:innen, Vertreter:innen beruflicher Ausbildungszweige, ...), durchgeführt (Häußler u. a. 1988). Die Expert:innen haben Themen, Situationen und Anlässe, sowie Hinweise dazu gegeben, wie Wissen erworben werden soll. Diese Aussagen wurden schrittweise systematisiert und den Expert:innen erneut, mit dem Ziel eine curriculare Legitimation zu erreichen, vorgelegt. Ähnliche Delphie-Studien mit unterschiedlichen Akteur:innen und methodischen Ansätzen sind in jüngerer Zeit u. a. auch im Bereich der Hochschule durchgeführt worden (vgl. Welzel und Haller 1998, Deeken, I. Neumann und Heinze 2020, Dürr 2016). Eine solche Umfrage würde den Rahmen eines Dissertationsprojektes jedoch überschreiten. Im Folgenden wird skizziert, wie sich in diesem Projekt dem bisher unerforschten Bereich der experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten auf universitärem Niveau unter Nutzung von Evidenzen aus unterschiedlichen Forschungsdomänen genähert wird.

Die grundlegende Forschungsfrage des Projektes lautet:

> Welche experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten sollen auf universitärem Niveau in Anfängerlaborpraktika von Physikstudierenden erworben werden und wie lassen diese sich im Rahmen der Kompetenzmodellierung passgenau beschreiben und systematisieren?

Für die Modellierung der experimentellen Kompetenz auf universitärem Niveau stehen aktuell noch keine konsensfähigen normativen Vorgaben bezüglich der Zielsetzungen universitärer Laborpraktika sowie der zu erwerbenden experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten zur Verfügung. Deswegen wird zunächst das Experimentieren als Erkenntnismethodik in der Wissenschaft Physik aus wissenschaftstheoretischer Perspektive analysiert (Kap. 2.1), um Hinweise dazu zu erhalten, welche Aspekte Kernelemente des wissenschaftlichen Experimentierens sind und dementsprechend bei der Ausbildung von Studierenden Relevanz besitzen. Ziel ist vor allem, charakterisierende Prozessmerkmale und Indikatoren für erfolgreiches Experimentieren sowie die Analyse der immanenten Werte und Normen des universitären Experimentierens herauszuarbeiten.

Die Erkenntnisse dieses Teils werden nachfolgend durch die lehr-lerntheoretische Analyse des Experimentierens in der Schule kontrastiert und erweitert (Kap.

2.2). Für die schulische Ausbildung liegen umfangreiche Forschungsarbeiten zur Lernwirksamkeit sowie normative Vorgaben für die Nutzung des Experimentes im Unterricht vor. Ziel ist die Identifikation von Gemeinsamkeiten aber auch Abgrenzungsmöglichkeiten zwischen dem schulischen und universitären Experimentieren sowie eine Analyse der experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten, die Schüler:innen typischerweise bis zum Abitur erwerben und damit als Vorwissen für ihr Physikstudium mitbringen.

In Abgrenzung zur Analyse der Zieldimension (Wissenschaftliches Experimentieren) sowie der Ausgangsdimension (Schulisches Experimentieren) werden anschließend Forschungsarbeiten zu den Zielsetzungen und zur Lernwirksamkeit von Laborpraktika diskutiert (2.3). Ziel ist die Herausarbeitung von Hinweisen zu den im Rahmen von Laborpraktika zu erwerbenden experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten in Abhängigkeit von der didaktischen Strukturierung des Laborpraktikums.

Auf Basis der Diskussion zum Status Quo, was Studierende in Experimentalpraktika lernen sollen, welches Wissen und welche Fähigkeiten und Fertigkeiten sie dazu aus der Schule mitbringen und was sie empirisch beobachtbar davon bzw. dazu lernen, werden anschließend die Grundlagen für die Modellierung der experimentellen Kompetenz auf universitärem Niveau diskutiert (Kap. 2.5). Ziel ist herauszuarbeiten, welche methodischen Schritte bei der Entwicklung eines Kompetenzmodells für experimentelle Fähigkeiten und Fertigkeiten von Physikstudierenden relevant sind und auf welche erfolgreichen Modellierungsansätze ggf. für den universitären Bereich zurückgegriffen werden kann.

Aus den herausgearbeiteten Erkenntnissen werden im Anschluss Arbeitsschritte abgeleitet (Kap. 3) und das Design der empirischen Studie (Kap. 4) sowie die methodische Herangehensweise bei der Datenerhebung (Kap. 6) und Auswertung (Kap. 8) vorgestellt. Die Ergebnisse werden vor dem Hintergrund der Perspektiven unterschiedlicher Akteur:innen hinsichtlich der Angemessenheit und Nutzbarkeit diskutiert (Kap. 9). Abschließend werden die Erkenntnisse des Projektes in das Forschungsfeld eingeordnet und hinsichtlich der Potenziale und Grenzen kritisch diskutiert (Kap. 10).

2. Theoretischer Teil

In diesem Kapitel werden zunächst als Grundlage für die Modellierung der experimentellen Kompetenz (Physik-)Studierender der Status Quo dazu, was Studierende in Laborpraktika lernen sollen, welches Wissen und welche Fähigkeiten und Fertigkeiten sie dazu aus der Schule mitbringen und was sie empirisch beobachtbar darüber bzw. dazu lernen, dargestellt. Im Kapitel 2.1 *Experimentieren in der Wissenschaft* wird, um ein adäquates Bild von den benötigten experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten am Ende der universitären Ausbildung zu erhalten, analysiert, welche Fähigkeiten und Fertigkeiten Forscher:innen für die Nutzung der Erkenntnismethode Experimentieren benötigen. In Abgrenzung dazu wird im Kapitel 2.2 *Experimentieren in der Schule* analysiert, mit welchen Fähigkeiten und Fertigkeiten im Bereich des Experimentierens Schüler:innen nach der Schule das Studium aufnehmen. Das Kapitel 2.3 *Experimentieren im Studium* dient dazu, die Zielsetzungen von Laborpraktika sowie die Fähigkeiten und Fertigkeiten von Student:innen im Verlauf ihres Studiums in Abhängigkeit ihres Vorwissens zu Studienbeginn bzw. der Zielsetzung des Studiums einzuordnen.

Auf Basis der Erkenntnisse aus der Diskussion zum Status Quo wird im Kapitel 2.5 *Modellierung und Messung experimenteller Kompetenz* der aktuelle Forschungsstand zur Kompetenzmodellierung allgemein sowie speziell für die Modellierung experimenteller Kompetenz dargestellt. Ziel ist abzuleiten, welche methodischen Schritte und welche Modellierungs- und Erhebungsansätze Adaptionspotenzial für die Modellierung der experimentellen Kompetenz Physikstudierender aufweisen.

2.1. Experimentieren in der Wissenschaft

Die Entwicklung eines Kompetenzmodells für die experimentelle Kompetenz (Physik-)Studierender setzt voraus, dass der Lerngegenstand, d. h. die experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten, definiert ist. Der Lerngegenstand umfasst die zu erlernenden Wissensbestände sowie experimentelle Fähigkeiten und Fertigkeiten auf universitärem Niveau. Bisher ist aufgrund der Komplexität sowie der Anzahl einsetzbarer Experimentierstrategien im Rahmen der Wissenschaftstheorie keine vereinheitlichende Theorie für die Erkenntnismethodik des Experimentierens entwickelt worden (Höttecke und Rieß 2015). Da das Studium der Physik und im Besonderen die Lehrveranstaltung Laborpraktikum die Studierenden mit den Standards dieser wissenschaftlichen Erkenntnismethode vertraut machen und sie u. a. auf die Arbeit als Forscher:innen vorbereiten soll, wird im Folgenden das Experimentieren als Erkenntnismethode in der Forschung analysiert.

Hierbei stellen sich drei Fragen: Erstens (Kap. 2.1.1), welche Charakteristika und Prozessbestandteile bzw. -strukturen weist die Erkenntnismethode des Experimentierens auf? Zweitens, welche theoretischen Ansätze können erklärmächtig in Bezug auf die kognitiven Prozesse von Forscher:innen beim Experimentieren sein (Kap. 2.1.2). Und drittens, welche dieser Aspekte müssen, in welcher qualitativen Ausprägung erworben werden, um ein:e gute:r Experimentator:in zu sein (Kap. 2.1.3)?

2.1.1. Erkenntnismethode des Experimentierens

Zur Näherung an die erste Frage zu den typischen Charakteristika sowie Prozessbestandteilen und -strukturen des universitären Experimentierens wird im Folgenden auf wissenschaftstheoretische Überlegungen zurückgegriffen. Die Wissenschaftstheorie befasst sich mit den Voraussetzungen, Methoden und Zielen von Wissenschaft sowie mit der Frage danach, wie Erkenntnisse gewonnen werden. Sie umfasst weiterhin diverse Teildisziplinen. Für die Frage nach den charakteristischen Merkmalen sowie Prozessstrukturen liefern die Wissenschaftsphilosophie, -soziologie und -psychologie Erklärungsansätze[4].

Grundsätzlich wird heute unter dem Konstrukt *Wissenschaft* die (Weiter-) Entwicklung von Wissen, also Erkenntnissen und Erfahrungen, inklusive der jeweiligen Begründungszusammenhänge in einem Gegenstandsbereich verstanden. In Abgrenzung dazu wird unter *Forschung* das methodisch kontrollierte und systematische Handeln bei der Generierung neuen Wissens verstanden (Höttecke und Rieß 2015).

Der Wissenschaftsphilosoph Reichenbach, ein Vertreter des logischen Empirismus, postulierte 1938 für die Erkenntnistheorie die Trennung zwischen Begründungs- (context of justification) und Entdeckungszusammenhängen (context of discovery) (Reichenbach 1938). Nach dem Ansatz des *context of justification* liefern Theorien Hypothesen, die empirisch überprüft werden. Andersherum werden im *context of discovery* Hypothesen durch Ideen oder Beobachtungen gefunden, empirisch geprüft sowie theoretisch fundiert. Eines der Ziele der Vertreter:innen des logischen Empirismus, die Wissenschaft im *context of justification* verorteten, war, logikbasierte und erkenntnisgenerierende Regeln und Kriterien für die philosophische Wissenschaftstheorie induktiv und deduktiv abzuleiten (Uebel 1996).

Auch Popper als Begründer der Denkschule des kritischen Rationalismus beschäftigte sich mit der Ableitung von Regeln, definierte jedoch Wissenschaft als

[4] In dieser Arbeit wird die Wissenschaftstheorie bzw. -forschung nur stark verkürzt und argumentativ auf das Projekt fokussiert dargestellt. Dieses Vorgehen wird aufgrund fehlender wissenschaftspsychologischer Arbeiten mit Fokus auf die Physik als Begründungsrahmen für die Modellierung experimenteller Kompetenz Physikstudierender genutzt.

"empirisch-wissenschaftliche Forschungsmethodik" (Popper 1935, S. 1) und nutzte somit handlungstheoretische Kategorien für die Definition von Wissenschaft. Dies leitet sich aus seiner Überzeugung ab, dass der Deduktivismus die einzige Erzeugungsgrundlage für Erkenntnisse darstellt (Popper 1935). Die Funktion des Experiments kann hier, wie auch bei den Vertreter:innen des logischen Empirismus, als beobachtungsgenerierend und theoriegeleitet charakterisiert werden (u. a. Mclaughlin 1995).[5] Das Ableiten formaler Regeln für die Absicherung wissenschaftlicher Aussagen gelang jedoch in beiden Denkschulen nicht einheitlich (Uebel 1996).

Hacking widersprach der Ansicht, dass das Experiment alleinig die Funktion der Überprüfung theoretischer Hypothesen besitzt und konstatiert, dass "Experimente, technische Verfahren oder der Gebrauch des Wissens [...]" (Hacking 1996, S. 251) in der Wissenschaftstheorie kaum Beachtung finden. Er sieht das Verhältnis von Experiment und Theorie als gleichberechtigt an (Hacking 1992) und betont damit die Prozesshaftigkeit der Forschung sowie das Wechselspiel vom *context of justification* und dem *context of discovery* als erkenntnisgenerierendes Element von Wissenschaft (vgl. u. a. Gooding 1992). Ähnliche Kritik äußerte auch Kuhn (Hoyningen-Huene 1989), der jedoch zusätzlich die Generierung einheitlicher Regelsysteme für die Erkenntnisgewinnung ablehnt (Kuhn 1962). Stattdessen definiert er, indem er durch seinen wissenschaftshistorischen Ansatz, der sowohl wissenschaftsphilosophische als auch -soziologische Theorien vereint, Wissenschaft nicht nur normativ-methodologisch, sondern als soziales Normengefüge und damit die wissenschaftliche Gemeinschaft als Akteur bei der Generierung von Wissen definiert (Kuhn 1962, Hoyningen-Huene 1989, Hoyningen-Huene 2006, Höttecke 2001). Weiterhin unterscheidet Kuhn zwischen *normaler* und *außerordentlicher* sowie *revolutionärer* Wissenschaft im Rahmen seines Erklärungsmodells zum wissenschaftlichen Fortschritt (Kuhn 1962). Im Rahmen der *normale* Wissenschaft würden nur Probleme analysiert, die mit dem vorherrschendem Wissen lösbar erscheinen. *Außerordentliche* Forschung findet dann statt, wenn versucht wird phänomenologische (Beobachtungs-)Anomalien mit Hilfe geteilter Gesetze und Theorien (wissenschaftliche Paradigmen) erklärbar zu machen. Bei der *revolutionären* Wissenschaft kommt es zu einem *Paradigmenwechsel*, d. h. es werden neue und innovative Erklärungsmodelle für phänomenologische Anomalien gefunden und diese müssen sich noch in der wissenschaftlichen Community bewähren.

In der Folge wendete sich die neuere wissenschaftstheoretische Forschung mehr den konkreten Prozessen der Wissensgenerierung durch Wissenschaftler:innen - also dem zielgerichteten Handeln beim Experimentieren - und dem *context of discovery* zu (Höttecke 2001, Fußnote 52, S. 215, Pickering 1992), um u. a.

[5] Popper definiert das Experiment als "ein durch theoretische Überlegungen geleitetes planmäßiges Handeln" (Popper 1935, S. 62).

Erklärungsansätze für die physikalische Grundlagenforschung zu liefern.[6] Die Funktion des Experiments hatte damit keinen "Werkzeugcharakter" mehr, der es ermöglicht, Phänomene zu beobachten, sondern einen Entdeckungscharakter, da die Untersuchungsgegenstände (physikalische Phänomene) erst durch das Experiment mittels gezielter Manipulation der Natur erzeugt und damit untersuchbar gemacht werden (u. a. Hacking 1992, Mclaughlin 1995, Gooding 1992).

Dieser neue wissenschaftstheoretische Ansatz ermöglicht einen Zugang zur Beschreibungsebene der Erkenntnismethodik des Experimentierens, was in diesem Projekt für die Ableitung der zu erwerbenden experimenteller Fähigkeiten und Fertigkeiten im Studium als Basis für die Modellierung experimenteller Kompetenz Physikstudierender genutzt wird.

Das Experimentieren stellt in den Naturwissenschaften wie der Chemie, Biologie oder der Physik eine der wichtigsten Erkenntnismethodiken dar. In der Physik wird diese Methodik im Rahmen von Forschungsarbeiten in der Experimentalphysik zur Generierung neuer Wissensbestände benutzt (u. a. Tetens 1987). Neu entwickeltes Wissen muss, damit es Gültigkeit erhält, innerhalb der wissenschaftlichen Gemeinschaft diskutiert und akzeptiert werden. Dazu ist es notwendig, dass das Wissen hinsichtlich der Geltung, also ob es objektiv und intersubjektiv gilt, überprüft wird. Dies wird erreicht, indem in der Wissenschaft mit standardisierten Erkenntnismethoden gearbeitet wird, die Erkenntnisse in z. B. wissenschaftlichen Zeitschriften veröffentlicht und auf Tagungen diskutiert werden. Schlussendlich können durch dieses Vorgehen andere Wissenschaftler:innen in einem Aushandlungsprozess die Erkenntnisse überprüfen, beurteilen und weiterentwickeln (Pickering 1989, Höttecke 2001).

Physikalische Fragestellungen in Forschungsarbeiten beziehen sich meist auf die Untersuchung physikalischer Phänomene, um entweder bestehende Theorien experimentell zu überprüfen oder, wenn noch keine Theorien vorhanden sind, diese durch ein exploratives Vorgehen systematisch zu entwickeln. Die Erkenntnismethodik des Experimentierens ist folglich sowohl dem *context of discovery* als auch dem *context of justification* zuzuordnen (u. a. Kuhn 1962, Hoyningen-Huene 2006, Gooding 1992).

Im Experimentierprozess versuchen die Forscher:innen das physikalische Phänomen in einem Labor durch gezielte Manipulation von Rahmen- und Anfangsbedingungen konstant zu erzeugen (Tetens 1987). Hauptaspekte sind dabei die

[6] Vertreter:innen der Fachdidaktik Physik, die dem wissenschaftshistorischen Ansatz folgen, sprechen hier von einem "practical turn" (Heering 2000, S. 795). Sie sehen in der Rekonstruktion historischer Experimente [mittels der Replikationsmethode] das Potential die Natur der Naturwissenschaft und damit verbunden auch den Prozesscharakter von Forschung gewinnbringend als Ergänzung für einen fachsystematischen Schulunterricht (z. B. mittels des historisch-genetischen Ansatzes) einsetzen zu können (u. a. Höttecke 2001, Höttecke, Henke und Rieß 2012, Heering 2000, Rieß 2000).

quantitative Messung von Signalen, die als Wirkung durch gezielte Variation von Variablen erzeugt werden sowie die Identifikation, Minimierung bzw. Kontrolle von Störvariablen, d. h. von Messeinflüssen, die nicht zum physikalischen Phänomen gehören und stattdessen von der Umgebung (Apparaturen, Messinstrumenten, Umwelteinflüsse, ...) bedingt werden, zu gestalten (u. a. Hacking 1992). Der Prozess des Experimentierens kann somit als Wechselspiel zwischen koordinierten systematischen Eingriffen und durch das Phänomen ausgelösten Verläufen, die wiederum zielgerichtete Eingriffe durch den Forschenden bedürfen, beschrieben werden (Tetens 1987).

Die experimentellen Handlungen der Forscher:innen werden durch das Analysieren und Beurteilen der Erkenntnisse der einzelnen Schritte vor dem Hintergrund theoretischer Annahmen und auch des experimentellen Setups ausgelöst. Dieser iterative und oftmals zeitintensive Prozess kann als ein komplexer *interaktiver Stabilisierungsprozess* ("interactive stabilisation", (Pickering 1989, S. 279)) mit dem Ziel, eine Kohärenz zwischen der *"material procedure"* (experimentelle Handlungen), dem *"instrumental model"* (Konzeptverständnis der Instrumente/Geräte) sowie dem *"phenomenal model"* (Konzeptverständnis des Phänomenbereichs) zu erreichen (Pickering 1989, S. 276; Höttecke und Rieß 2015), charakterisiert werden. Die drei Elemente stehen während des Stabilisierungsprozesses in ständiger Wechselwirkung miteinander, wobei das Element "*phenomenal model*" den beiden anderen Elementen kontinuierlich als Referenzpunkt der Analyse und Beurteilung dient (Pickering 1989).

Der *interaktive Stabilisierungsprozess* sorgt dafür, dass Forscher:innen sich beim Stabilisieren der physikalischen Phänomene oftmals jahrelang in einem „Schwebezustand“ (Höttecke und Rieß 2015, S.136) befinden (siehe Abb. 1). Sie versuchen das Phänomen meist in einem System aus mehreren Experimenten heraus zu präparieren und zu prüfen. Dabei müssen sie diverse Test- und Optimierungsschleifen durchlaufen. In den Testläufen werden die erhaltenen Erkenntnisse ständig vor dem Hintergrund theoretischer, materieller und praktischer Überlegungen in Bezug auf den Gesamtprozess (Gott und Duggan 1996) analysiert und interpretiert. Weitere Merkmale des komplexen Forschungsprozesses des Experimentierens stellen das geringe Maß an Planbarkeit (Höttecke und Rieß 2015), die hohe Anzahl an Handlungsoptionen und möglicher einsetzbarer experimenteller Heuristiken (Tetens 1987) sowie die Notwendigkeit zum kreativem Denken (Reinhold 1996), wenn bei zufällig entstehenden Begebenheiten Improvisation notwendig ist (Rheinberger und Hagner 1995), sowie schlussendlich ein hohes Maß an Inkohärenz und Unsicherheit (Pickering 1989), dar.

Das Ende eines Experimentes ist aufgrund der Natur des Experimentierens nicht fest definiert (Galison 1987). Vielmehr ist es so, dass der Stabilisierungsprozess ohne beeinflussende Rahmenbedingungen immer weiterlaufen würde. In der Forschungsrealität bestimmen externe Faktoren wie Projektlaufzeiten, die Not-

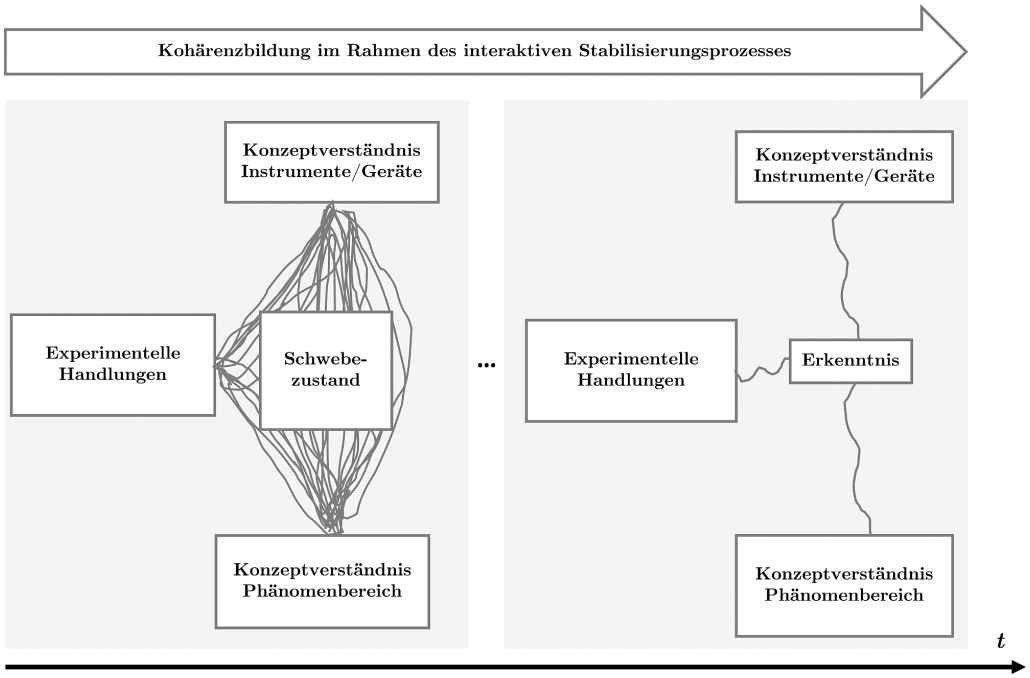


Abb. 1: Visualisierung des Experimentierprozesses in der Forschung: Die Forscherin bzw. der Forscher befindet sich zu Beginn in einem Schwebezustand zwischen den drei Aspekten. Durch den interaktiven Stabilisierungsprozess wird im Verlauf des Forschungsprozesses eine Kohärenz zwischen den drei Aspekten (experimentelle Stabilisierung) erreicht und damit verbunden Erkenntnisse gewonnen.

wendigkeit teureren Equipments für eine noch bessere Stabilisierung, Trends in der wissenschaftlichen Gemeinschaft oder das Ende der Qualifikationszeit der Forschenden die Beendigung eines Experimentes (Galison 1987). Mit dem Abschluss eines Experimentes sind jedoch die erhalten Erkenntnisse noch nicht in der Forschungsgemeinschaft anerkannt. Dies geschieht erst im Rahmen eines weiteren und diesmal als sozial zu charakterisierenden Aushandlungsprozesses: Erst durch die Präsentation, Diskussion und positive Rezeption von Erkenntnissen im Rahmen der wissenschaftlichen Gemeinschaft kann Wissen als gültig angesehen werden (Pickering 1989, Höttecke 2001).

Für die Tätigkeit des Experimentierens benötigen Forscher:innen dementsprechend multidimensional vernetzte domänenspezifische Wissensbestände, die sich in elaborierten experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten manifestieren, sowie allgemeine und fachspezifische Problemlösefähigkeiten, argumentative und metakognitive Fähigkeiten sowie Wissen über Regeln der Zunft[7], die sie im Rahmen

[7] An dieser Stelle kann auch von epistemologischen Überzeugungen der Fachkultur gesprochen werden. Ein Beispiel für eine Regelung, die innerhalb der Zunft entwickelt worden ist, stellen die Qualitätskriterien für "Gute wissenschaftliche Praxis" (Empfehlung der Konferenz der Fachbereiche Physik 18. Mai 2016) der Konferenz der Fachbereiche Physik dar.

jahrelanger Ausbildung zunächst im Studium und anschließend innerhalb der forschenden Arbeitsgruppen durch experimentelle Untersuchungen verschiedener physikalischer Phänomene erwerben.

Als Arbeitsdefinition für die Modellierung der experimentellen Kompetenz Physikstudierender und als Vorbereitung auf die Beantwortung der zweiten Frage nach Ansätzen für die theoretische Rahmung kognitiver Prozesse von Forscher:innen beim Experimentieren wird folgende Arbeitsdefinition für die Erkenntnismethode des Experimentierens abgeleitet:

> Ziel des Experimentierens ist das stabile Herauspräparieren interpretierbarer Signale physikalischer Phänomene (Tetens 1987, Galison 1987, Höttecke und Rieß 2015, Breidbach u. a. 2010), mit dem Ziel einer Kohärenzbildung zwischen theoretischen, materiellen und praktischen Konzepten (Höttecke und Rieß 2015, Pickering 1989).

2.1.2. Theoretische Rahmung für kognitive Prozesse beim wissenschaftlichen Experimentieren - Logisches Schließen

Mit der Frage nach den Charakteristika und Prozessstrukturen des wissenschaftlichen Forschens ist auch die Frage nach den kognitiven Denkprozessen von Forscher:innen und hier insbesondere, wie Forscher:innen neue Erkenntnisse generieren, eng verknüpft. In Bezug auf das logische Schließen können drei Arten unterschieden werden: *Deduktion*, *Induktion*, *Abduktion* (u. a. Peirce 1978).

Bei der Schlussformel *Deduktion* wird aus allgemeinen Regeln bzw. Gesetzen (Kausalität) und Einzelfällen (Ursachen) ein Resultat abgeleitet (Meyer 2009). Deduktive Schlüsse sind wahrheitsübertragend, d. h. ausgehend von der Wahrheit der Regeln und Fälle kann auf die Wahrheit der Resultate geschlossen werden, jedoch nicht erkenntniserweiternd, da das Resultat in allgemeinerer Form in der Kausalität enthalten ist (Meyer 2009). Diese Art des Schließens dominiert vor allem in theoretischen Wissenschaften (Meyer 2009).

Beim *induktiven Schließen* wird aus speziellen Prämissen auf ein allgemeines Gesetz geschlossen. Dieses Schließen kann als gehaltserweiternd jedoch logisch nicht unangreifbar definiert werden (Krüger und Upmeier zu Belzen 2021). "Kenntniserweiternd ist dieser Schluss nur insofern, als er von einer begrenzten Auswahl auf eine größere Gesamtheit schließt. Neues Wissen (im strengen Sinne) wird auf diese Weise nicht gewonnen, bekanntes lediglich ausgeweitet." (Reichertz 2016, S. 131).

Das *abduktive Schließen* ist dadurch charakterisiert, dass als Erklärung für ein be-

obachtetes überraschendes Phänomen, für das es noch keine Erklärung oder Regel gibt (Reichertz 2016), eine mögliche Erklärung gefunden wird. Die Abduktion stellt folglich ein hypothetisches und kreatives Schließen dar. "Bei der Abduktion handelt es sich somit um einen hypothetischen Schluss, mit dem sich nur plausible, jedoch keinesfalls sichere Hypothesen bilden lassen." (Meyer 2009, S. 307). Abduktion kann dementsprechend für die Analyse von Denkprozessen im Bereich des *context of discovery* bei der Generierung neuer Erkenntnisse ausgehend von einer Beobachtung, die nicht mittels bestehendem theoretischen Wissens erklärt werden kann, genutzt werden.

Es können zwei unterschiedliche Arten unterschieden werden: Bei der *unter-* oder *übercodierten Abduktion* wird ein Gesetz assoziiert, bei der *kreativen Abduktion* wird ein Gesetz generiert. Im letzteren Fall ist Abduktion gehalts- und erkenntniserweiternd (Krüger und Upmeier zu Belzen 2021). Der kognitive Prozess, der bei der Abduktion absolviert wird, kann als ein Zusammensetzen von Ideen des Hintergrundwissens verstanden werden, wodurch eine neue erklärende Idee entsteht (Meyer 2009, S. 309).[8] "Endpunkt dieser Suche ist eine (sprachliche) Hypothese. Ist diese gefunden, beginnt in der Regel (sowohl in der quantitativen als auch in der qualitativen Forschung) ein mehrstufiger Überprüfungsprozess." (Reichertz 2016, S. 155).

Meier beschreibt das Zusammenspiel zwischen Induktion, Deduktion und Abduktion während des Forschungsprozesses folgendermaßen:

> "Während zur Sicherung einer abduktiv gewonnenen Hypothese auf theoretischen Erkenntniswegen nur Deduktionen verwendet werden, erfolgt die Erkenntnissicherung bei diesem Ansatz mittels einer Kombination von Deduktion und Induktion: Nachdem abduktiv eine Hypothese generiert wurde, deduzieren wir deren notwendigen und möglichen Konsequenzen. Die Konsequenzen können anschließend (experimentell oder theoretisch) überprüft werden. Mit dem Ergebnis des Tests kann die Hypothese induktiv bestätigt [...] oder widerlegt [...] werden." (Meyer 2009, S. 316).

Die drei Arten des Schließens stellen folglich auch die zentralen kognitiven Denkprozesse des wissenschaftlichen Forschens dar und werden abhängig von der Art der Beobachtung bzw. der Hypothese mittels unterschiedlicher methodischer Herangehens- und Arbeitsweisen (Upmeier zu Belzen und Krüger 2019) eingesetzt. Mit Blick auf die physikalische Forschung bietet vor allem die Abduktion potenti-

[8] Ein Beispiel, dass das abstrakte Konzept des abduktiven Schließens greifbarer macht, ist die Arbeitsweise von Ärzt:innen. Diese stellen auf Basis unterschiedlicher Symptome, die zusammen genommen auf ein Krankheitsbild schließen lassen, eine mögliche Diagnose. Diese Diagnose ist jedoch vorläufig, solange sie nicht durch weitere Tests überprüft wird, und unsicher, weil es auch noch alternative Erklärungsansätze für das Krankheitsbild geben kann.

ell Erklärungsmächtigkeit für die kognitiven Prozesse, die beim Stabilisieren des Schwebezustands beim wissenschaftlichen Experimentieren im *context of discovery* im Spannungsfeld von theoretischen, materiellen und praktischen Aspekten (siehe Abb. 1) stattfinden. Forscher:innen wechseln jeweils zwischen den drei Konzepten, wenn unplausible Ergebnisse oder Hypothesen erreicht werden und versuchen durch die Analyse der zwei anderen Ebenen einen plausiblen Erklärungsansatz zu finden. Krüger und Upmeier zu Belzen (2021) resümieren hinsichtlich der Abduktion:

> "Die im idealtypischen Prozess beschriebenen Komponenten verdeutlichen, dass abduktives Schließen nach einer Phase der Exploration unter Bezug auf theoretisches Wissen in ein kreatives Entscheiden, Begründen und Prüfen überleitet, das anspruchsvoll ist und in einer konsistenten Erklärung münden kann (Clement 2008)." (Krüger und Upmeier zu Belzen 2021, S. 131).

Einen Ansatz dafür liefert die von Johnson (2001) entwickelte Theorie, die den impliziten Prozess des abduktiven Schließens inklusive seiner Komponenten kognitionspsychologisch fundiert (siehe Abb. 2). Die Abduktion beginnt mit der Beobachtung eines Phänomens (collect data), welches explorativ und mit Hilfe von bestehendem domänenspezifischem Wissen (Gesetz) verstanden (comprehend) wird. Wenn für die gebildete Hypothese (Fall) mehrere Erklärungsansätze vorliegen, wird im Sinne der untercodierten oder kreativen Abduktion versucht, eine Begründung (refine) zu finden. Wenn das Resultat der Begründung bei der Überprüfung (check) nicht widerspruchsfrei bzw. unplausibel ist, es also mehrere Erklärungen gibt, wird die Entscheidung (discriminate) für weitere Beobachtungen getroffen. In dem Fall, dass nach dem Verstehen (comprehend) ein plausibler Erklärungsansatz gefunden werden kann, wird dieser auf Plausibilität überprüft (check). Im Fall einer unplausiblen Erklärung beginnt wieder die Beobachtung von Phänomenen bzw. das Sammeln von Daten. Stellt sich die gefundene Hypothese beim Plausibilitätscheck als belastbar heraus, wird diese auf Widersprüche geprüft (check) und mögliche Widersprüche durch erneutes Datensammeln gelöst (resolve anomaly). Wenn die Hypothese plausibel ist und keine Widersprüche mehr existieren wird daraus ein Modell (Gesetz) abgeleitet und getestet (test) (T. R. Johnson und Krems 2001, Krüger und Upmeier zu Belzen 2021).

Das Zusammenspiel der drei Arten des Schließens, des impliziten Prozesses bei der Abduktion sowie der stark iterativen Kohärenzbildung zwischen theoretischen, materiellen und praktischen Konzepten beim Herauspräparieren von physikalischen Phänomenen in der Forschung wird im folgendem historischen Beispiel der "zufälligen" Entdeckung der Grundlage für den Nachweis des kosmischen Mikrowellenhintergrundes durch Arno Penzias und Robert Wilson im Jahre 1964 deutlich (Bennett u. a. 2020).

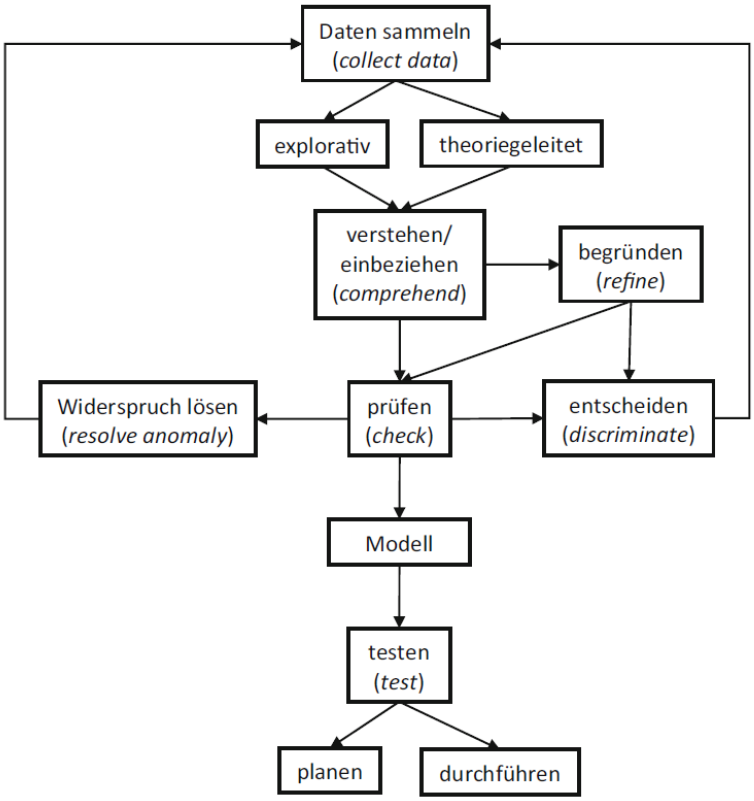


Abb. 2: Prozessdarstellung des abduktiven Schließens nach T. R. Johnson und Krems 2001 in Abänderung von Krüger und Upmeier zu Belzen 2021, S. 130

Penzias und Wilson arbeiteten im Jahr 1964 an den Bell Labs an der Weiterentwicklung der passiven Satellitenkommunikation. Ihre Experimente sahen die ultrapräzise Messung von Radarreflexionen an Messballons vor. Hierzu wurde, um minimales Detektorrauschen zu erreichen, eine für damalige Verhältnisse hochsensitive Antenne mit flüssig-helium-gekühlter Elektronik verwendet. Ebenfalls wurden sämtliche bekannten terrestrischen Störquellen (Funk- und Radio-Sender) im Vorfeld identifiziert und ggf. herausgefiltert. Während ihrer Experimente stellten Penzias und Wilson jedoch fest, dass sie ein bis zu 100-fach höheres Rauschen in einem Wellenlängenbereich um 7 cm beobachteten, als sie auf Basis der Charakteristika der Antenne und des Equipments erwarteten (collect data). Als Erklärung für dieses Rauschen (comprehend) wurden verschiedene weitere noch unbeachtete Störquellen vermutet (refine). Hierzu zählen beispielsweise der Einfluss der Sonne und anderer bekannter astronomischer Quellen und ihrer Position relativ zur Antenne oder eine Verschmutzung dieser durch nistende Tauben (check). Jedoch wurde das Phänomen auch nach Reinigung der Antenne von den Hinterlassenschaften der Tauben sowie unabhängig von der Tages- oder Nachtzeit und sogar der Ausrichtung der Antenne in allen Himmelsrichtungen beobachtet (resolve anomaly). Daher vermuteten Penzias und Wilson im Anschluss eine astronomi-

sche Quelle außerhalb der Milchstraße (comprehend), welche die Beobachtungen erklären können, konnten jedoch keine genauere Quelle identifizieren. Erst nach Diskussion mit befreundeten Physikern, wurden die beiden auf eine Arbeit von Physikern vom MIT aufmerksam, die den kosmischen Mikrowellenhintergrund im entsprechenden Frequenzbereich vorhergesagt hatten. Der Vergleich mit den Vorhersagen (check) zeigte, dass alle Beobachtungen in ihrem Experiment plausibel und schlüssig erklären werden konnten. Sie hatten damit den experimentellen Nachweis des kosmischen Mikrowellenhintergrunds geliefert (Modell).

2.1.3. Experimentelle Könner:innen - Charakteristika von Expert:innen beim Lösen komplexer Probleme

Auf Basis der Definition des Experimentierens und der theoretischen Analyse (kognitiver) Prozessstrukturen beim Experimentieren in der Forschung kann nun der Frage nachgegangen werden, welche der abgeleiteten Fähigkeiten und Fertigkeiten müssen, mit welcher qualitativen Ausprägung erworben werden, um als ein:e gute:r Experimentator:in zu gelten. Es liegen bisher nur vereinzelte Forschungserkenntnisse für das physikalische Experimentieren in der Forschung vor. Deswegen wird stattdessen als Grundlage der Analyse auf Erkenntnisse aus der Expertiseforschung mit Fokus auf physikalische Problemlösefähigkeiten zurückgegriffen. Physikalische Problemlösefähigkeiten werden mit Hilfe komplexer physikalischer Problemstellungen untersucht, sodass die Ergebnisse Hinweise darauf liefern können, was Expertise beim Experimentieren in der Forschung charakterisiert. Die Arbeiten von Hackling und Garnett in den 1990er Jahren stellt hier eine Ausnahme dar. Die beiden konnten anhand eines Experten-Novizen-Vergleichs beim Experimentieren (Physiker:innen versus Schüler:innen 12. Klasse) zeigen, dass die charakteristischen Merkmale von Expert:innen, die in der klassischen Problemlöseforschung anhand physikalischer Problemlöseaufgaben identifiziert wurden, auch beim Experimentieren wieder zu finden sind (Hackling und Garnett 1995, Hackling und Garnett 1990, Hackling und Garnett 1991, Hackling und Garnett 1992).[9]

Im Bereich der Problemlöseforschung[10] können zwei Denkschulen (Sternberg 1995) unterschieden werden: Erstens der *könnenszentrierte Ansatz* und zweitens der *wissenszentrierte Ansatz* (Reinhold, Lind und Friege 1999). Beim könnenszentrierten Ansatz wird das Handeln, also die Strategien des Problemlösens sowie

[9] Hackling und Garnett nutzten die Ergebnisse jedoch in Bezug auf die defizitäre Ausbildung von Schüler:innen im Bereich des Experimentierens und untersuchten damit das universitäre Experimentieren nicht tiefer gehend.

[10] In dieser Arbeit werden nur zentrale Ergebnisse der Expertiseforschung mit Fokus auf physikalische Problemlösefähigkeiten berichtet. Für einen tieferen Einblick in diesen Forschungsbereich können diverse Review-Artikel und Überblickswerke genutzt werden (u. a. Gruber und Ziegler 1996, Ericsson 1991, Chi, Glaser und Farr 1988).

allgemeine Problemlösefähigkeiten in teils komplexen Situationen untersucht (Gruber und Mandl 1996). Für die Untersuchungen werden Probleme, die kein spezifisches Domänenwissen benötigen, wie beispielsweise das Schachspielen oder Steuerungssimulationen, ausgewählt (Funke 2003). Nach diesem Ansatz wird Expertise als Resultat von Lernen und Erfahrung definiert (Reinhold, Lind und Friege 1999). Beim wissenszentrierten Ansatz werden andersherum Problemlösefähigkeiten auf kognitive Dispositionen zurückgeführt. Die Forschungsarbeiten in diesem Feld nutzen für die Analyse der Problemlösefähigkeiten komplexe Problemsituationen, deren Lösung fachspezifische Wissensbestände benötigen (Reinhold, Lind und Friege 1999, Chi, Glaser und Rees 1982).

Seit den 1980er Jahren sind diverse Forschungsarbeiten im Bereich der wissenszentrierten Problemlöseforschung mit Fokus auf physikalische Problemlösefähigkeiten entstanden (Chi, Feltovich und Glaser 1981, Chi, Glaser und Rees 1982, Maichle 1985, D. Simon und H. Simon 1978, Woitkowski 2018, Brandenburger 2016). Durch den Ansatz der Experten-Novizen-Vergleiche sind gezielt Gegensätze zwischen unterschiedlich fähigen Proband:innen beim Lösen physikalischer Problemlöseaufgaben herausgearbeitet worden. Zentrale Themen waren die Analyse der Anforderungen an die Expert:innen (Problemstrukturen, korrekte und effektive Lösungsansätze), Analyse der Performanz (Wahrnehmung und Kategorisierung von Problemen) und Analyse des Wissens (Inhalte, sachliche Richtigkeit, quantitative und qualitative Unterschiede zwischen Experten und Novizen) (Bromme 1992). Im Bereich des fachspezifischen Problemlösens ist vor allem das Modell von Friege (2001) zum wissenszentrierten Problemlösens wegweisend. Er hat basierend auf der Untersuchung des Zusammenhangs von Wissen und Problemlösen ein Modell entwickelt, das es ermöglicht, den Expertisegrad abhängig von den zwei Maßen, Wissensstruktur und Prozessstruktur, zu bestimmen (Friege 2001). An dem Modell des wissenszentrierten Problemlösens (Abb. 3) ist besonders, dass neben der Struktur der Wissensressourcen auch das Wissen über Beispiele in Form von Problemschemata, die aus Beispielproblemen und dazu passenden Lösungswegen bestehen, Einfluss auf den Expertisegrad besitzen. Hier wird Erfahrung folglich über die Anzahl und Qualität (Abstraktionsgrad) der in den Problemschemata immanenten Beispiele definiert (Reinhold, Lind und Friege 1999, Friege 2001).

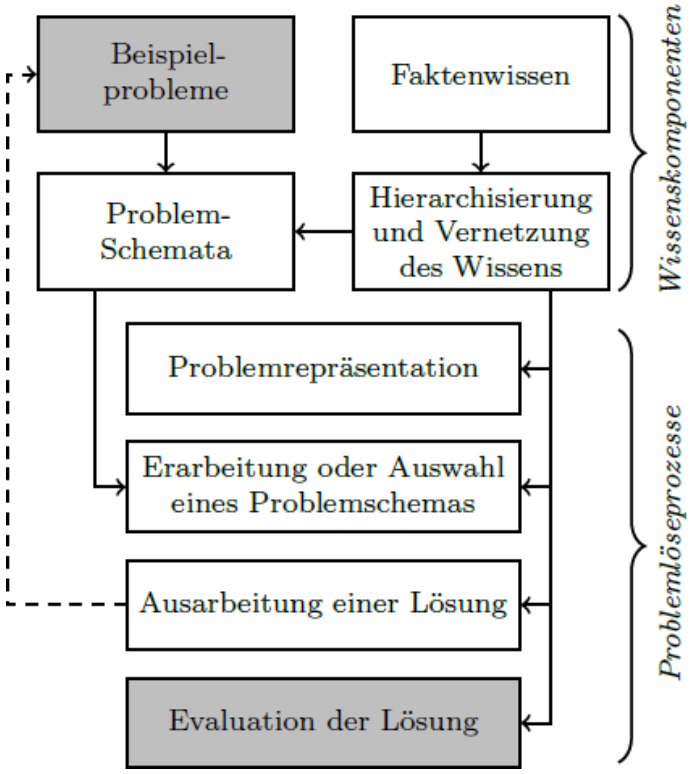


Abb. 3: In der Abbildung ist das Modell zum wissenszentrierten Problemlösen dargestellt (entnommen aus: Friege 2001).

Insgesamt zeigt sich, dass als Expert:innen deklarierte Proband:innen[11] beim Lösen physikalischer Probleme über dichter vernetzte fachspezifische Wissensstrukturen sowie über komplexere, fachspezifische Strategien verfügen (Schvaneveldt u. a. 1985, Chi, Glaser und Rees 1982, Maichle 1985, Woitkowski 2018, Brandenburger 2016). Diese Merkmale sorgen dafür, dass Expert:innen länger, aber effizienter an Problemanalyse und -repräsentationen arbeiten (Chi, Glaser und Rees 1982, Hackling und Garnett 1992, E. J. Johnson 1988), da sie aufgrund einer besseren Wahrnehmung bedeutungshaltiger Muster (Tiefenstruktur) (Egan und Schwarz 1979, Shavelson 1974) fundiertere Lösungsansätze bilden können. Dabei suchen sie gezielt nach Verknüpfungen zwischen den einzelnen Bestandteilen des Problems und arbeiten auf einem hohem Abstraktionsniveau (Chi, Glaser und Rees 1982, Hackling und Garnett 1992). Insgesamt sind Expert:innen schneller und genauer beim Lösungsprozess (Larkin 1981) und weisen eine zielorientiertere und akkuratere Selbstüberwachung auf (u. a. Reinhold, Lind und Friege 1999, D. Simon und H. Simon 1978, Hackling und Garnett 1992).

Noviz:innen hingegen besitzen eher gering verknüpfte fachspezifische Wissensstrukturen und schwache bzw. allgemeine Strategien (Larkin 1981, Chi, Glaser

[11] Expertise stellt immer einen relativen Begriff dar, der durch die Fähigkeitsunterschiede der untersuchten Stichprobe definiert wird (u. a. Reimann 1998).

und Rees 1982, Maichle 1985, Brandenburger 2016). Dies äußert sich darin, dass sie aufgrund der oberflächlichen Organisation ihre Wissensressourcen schwieriger zur Lösung von Problemen abrufen können (Chi, Glaser und Rees 1982). Anders als Expert:innen, die Verknüpfungen zwischen Informationen herstellen, listen Noviz:innen Informationen auf und probieren Strategien aus, die nicht passgenau sind (Chi, Glaser und Rees 1982, Reimann 1998). Sie durchdenken folglich ein Problem weniger tief, orientieren sich eher an Oberflächenmerkmalen (z. B. Zahlenwerte statt physikalische Phänomene) und beginnen folglich schneller mit dem Berechnen einer Lösung. Bei der Lösung machen sie mehr Fehler und weisen eine geringe Selbstüberwachung auf (Reimann 1998, Chi, Glaser und Rees 1982, Larkin 1981, D. Simon und H. Simon 1978, Hackling und Garnett 1992).

Bislang sind unterschiedliche Modelle zur Erklärung des Prozesses des Expertiseerwerbs entwickelt worden.[12] "Die Modellierung echter Expertenleistungen steht allerdings [...] noch aus" (Reimann 1998, S. 358). Für ein solches Modell stellt sich der Erwerb von Kompetenzen aufgrund der großen Komplexität von Lernprozessen mit allen Einflussfaktoren und Rahmenbedingungen als zu heterogen dar. Weiterhin ist noch unklar, welche Strukturen Wissensressourcen aufweisen, wie diese sich zu flexiblen Wissensnetzwerken zusammenfügen und sich diese umfänglich beeinflussen lassen, um Lernprozesse für alle Lerner:innen erfolgreich gestalten zu können.

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass Expertise über die Adaptivität der experimentellen Fähigkeiten definiert werden kann (Reimann 1998). Expert:innen haben auf dem Weg zur Expertise ihre fachspezifischen Wissensnetzwerke sowie Strategien anhand multipler Situationen erprobt, weiterentwickelt und so schrittweise abstrahiert. Ihre Fähigkeiten und Fertigkeiten sind dementsprechend flexibel vernetzt und somit in neuen Situationen adaptiv einsetzbar (Reimann 1998, Chi, Glaser und Rees 1982).

Experimentieren in der physikalischen Forschung weist aufgrund der inhaltlichen Anforderungen sowie der Komplexität der Problemstellungen deutliche Ähnlichkeiten zum physikalischen Problemlösen auf. Es ist deshalb davon auszugehen, dass Expertise beim Experimentieren ebenfalls auf stark vernetzte fachspezifische Wissensstrukturen sowie komplexe Strategien zurückzuführen ist. Unterschiede sind jedoch vermutlich hinsichtlich der Komplexität der Lösungsprozesse und -strategien zu erwarten, da beim Experimentieren zusätzlich experimentelle Handlungen mit einbezogen werden müssen, sowie hinsichtlich der notwendigen experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten, die zusätzlich zu fachspezifischen um technische und praktische Wissensressourcen erweitert werden müssen.

[12] Beispielhaft sollen hier zwei Modelle genannt werden: Das ACT*-Modell von Anderson (Anderson 1992), das auf dem Ansatz von Produktionssystemprogrammen basiert und das Modell von Schmidt, Norman, Boshuizen für den Expertiseerwerb in der Medizin, das Expertise als Erfahrung modelliert (Schmidt, Norman und Boshuizen 1990)

Für die Modellierung der experimentellen Kompetenz Physikstudierender wird basierend auf der Analyse des Experimentierens als Erkenntnismethode in der physikalischen Forschung folgende Arbeitshypothese genutzt:

> Die Qualität des Experimentierens zeigt sich in der argumentativen und evidenzbasierten Fundierung der einzelnen experimentellen Schritte und gefundenen Erkenntnisse vor dem Hintergrund des Gesamtprozesses mittels theoretischer, technischer und praktischer Wissensressourcen.

2.1.4. Fazit

Für die Modellierung der experimentellen Kompetenz Physikstudierender kann nach der Analyse des physikalischen Experimentierens in der Forschung festgehalten werden, dass bisher keine Untersuchungen bezüglich der benötigten Wissensressourcen sowie der experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten gemacht wurden. Beim Experimentieren handelt es sich um einen komplexen Prozess im Spannungsfeld zwischen der Theorie, den Geräten und den experimentellen Handlungen. In dem Prozess werden iterativ je nach Problemstellung unterschiedliche Formen des Schließens verwendet, um z. B. Theorien zu bestätigen oder unerwartete Beobachtungen zu erklären. Expertise zeichnet sich dabei über eine hohe Adaptivität der experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten aus. Welche Personenmerkmale wie Kreativität, Erfahrungen usw. eine Rolle bei experimenteller Könnerschaft spielen, ist aktuell noch ungeklärt.

2.2. Experimentieren in der Schule

Nach der Analyse des Experimentierens in der Forschung, die den Soll-Zustand der experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten beim Erlernen des Experimentierens im akademischen Bereich repräsentiert, wird im Folgenden analysiert, welches Vorwissen Studierende bezogen auf das Experimentieren zu Beginn ihres Studiums aus der Schule mitbringen. Ziel ist die Abgrenzung des universitären und schulischen Experimentierens, um so für die Modellierung der experimentellen Kompetenz Physikstudierender Aussagen zum niedrigsten Niveau der experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten zu Studienbeginn ableiten zu können. Dazu werden im Folgenden die Funktionen, Ziele (Kap. 2.2.1), die didaktische Einbettung des schulischen Experimentierens (Kap. 2.2.2), sowie das erworbene Niveau der experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten von Schüler:innen bis zum Abitur und die allgemeine Lernwirksamkeit von Experimenten (Kap. 2.2.3) diskutiert.

2.2.1. Ziele des Experimentierens in der Schule

In den nationalen Bildungsstandards und abgeleitet daraus in den Rahmenlehrplänen der Bundesländer Deutschlands werden abhängig von der jeweiligen Schulform und Klassenstufe die von den Schüler:innen zu erwerbenden Learning-Outcomes definiert. Sie sichern somit das Anspruchsniveau und sorgen für eine Vergleichbarkeit der Learning-Outcomes. Als grundsätzliches Ziel des schulischen Physikunterrichts sollen die Schüler:innen beim Erwerb einer naturwissenschaftlichen Grundbildung (scientific literacy) unterstützt werden (Bybee 1997). Das Konstrukt *scientific literacy* wird seit der Reform des deutschen Schulsystems als Folge des PISA-Schock zu Beginn des 21. Jahrhunderts in Lehrplänen und auch in nationalen wie internationalen Schulleistungsstudien, wie z. B. PISA, genutzt. Im Rahmen der PISA-Studien wird *scientific literacy* definiert als

> "[...] die Fähigkeit, sich mit naturwissenschaftlichen Themen und Ideen als reflektierender Bürger auseinanderzusetzen. Eine Person, die über eine naturwissenschaftliche Grundbildung verfügt, ist dazu bereit, sich argumentativ mit Naturwissenschaften und Technologie auseinanderzusetzen. Dies erfordert die Kompetenzen, Phänomene naturwissenschaftlich zu erklären, naturwissenschaftliche Forschung zu bewerten und naturwissenschaftliche Untersuchungen zu planen und Daten und Evidenz naturwissenschaftlich zu interpretieren." (OECD 2016, S. 56).

Der Frage nach den Zielen, die mit dem Experimentieren in der Schule verbunden

sind, haben sich diverse Forschungsprojekte gewidmet.[13] Die Ziele bezogen auf *scientific literacy* können mittlerweile als Konsens angesehen werden.

Scientific literacy ist von der Kultusminister Konferenz (KMK) als Grundlage für die Definition der Bildungsstandards und für die Erstellung der neuen Kernlehrpläne (Outcome-Orientierung) der einzelnen Bundesländer genutzt worden. In den Bildungsstandards werden die Kompetenzbereiche (Prozesse) und Inhaltsfelder (Gegenstände) zu Kompetenzerwartungen verknüpft, um dem "gleichzeitigen Einsatz von Können und Wissen bei der Bewältigung von Anforderungssituationen" (Kernlehrplan Sekundarstufe I 2019, S. 12) Rechnung zu tragen. Kompetenzbereiche stellen die "Grunddimension des fachlichen Handelns" (S. 12) dar. Als Kompetenzbereiche werden definiert: Die *Sachkompetenz*[14], die *Erkenntnisgewinnungskompetenz*, die *Kommunikationskompetenz* und die *Bewertungskompetenz* (KMK 2020). Die Kompetenzerwartungen in diesen Bereichen werden je Jahrgangsstufe und Schulform definiert.

Dem Experiment bzw. dem Experimentieren wird in den Bildungsstandards vor allem im Kompetenzbereich *Erkenntnisgewinnungskompetenz* ein hoher Stellenwert eingeräumt:

> "Physikalische Erkenntnisgewinnung ist zum einen bestimmt durch die theoretische Beschreibung der Natur, die mit der Bildung von Fachbegriffen, Modellen und Theorien einhergeht, und zum anderen durch empirische Methoden, v. a. das Experimentieren, mit denen Gültigkeit und Relevanz dieser Beschreibung abgesichert werden." (KMK 2020, S. 15)

Für die Sekundarstufe II werden in den Bildungsstandards für das Experimentieren im Kompetenzbereich *Erkenntnisgewinnungskompetenz*[15] vier zentrale Schritte definiert:

- "Formulierung von Fragestellungen,
- Ableitung von Hypothesen,
- Planung und Durchführung von Untersuchungen,

[13] Vgl. Übersichtsarbeiten: u. a. K. Arndt 2016, Emden 2011, Lunetta 1998, Lunetta, Hofstein und Clough 2007, Kempa 1986, Hodson 1996, Welzel und Haller 1998

[14] In den Bildungsstandards für die Sekundarstufe I wird hier noch vom Kompetenzbereich *Fachwissen* gesprochen. In der Neuauflage der Bildungsstandards für die Sekundarstufe II von 2020 wird dieser Kompetenzbereich mit *Sachkompetenz* überschrieben.

[15] Werden diese Schritte nur im Sinne der Anwendung eines erlernten Verfahrens ohne Einbettung in den Prozess der Erkenntnisgewinnung im Unterricht eingesetzt, ist das Experimentieren dem Kompetenzbereich *Sachkompetenz* zuzuordnen.

- Auswertung, Interpretation und methodische Reflexion zur Widerlegung bzw. Stützung der Hypothese sowie zur Beantwortung der Fragestellung." (KMK 2020, S. 16)

In den Bildungsstandards wird ebenfalls festgelegt, welche Fähigkeiten und Fertigkeiten Schüler:innen im Kompetenzbereich *Erkenntnisgewinnungskompetenz* in den drei Bereichen *Naturwissenschaftliche Untersuchung*, *Naturwissenschaftliche Erkenntnisgewinnung* und *Wissenschaftstheoretische Reflexion* mit eingegrenzter Komplexität bis zum Ende der Sekundarstufe II erwerben sollen:

- "Fragestellungen und Hypothesen auf Basis von Beobachtungen und Theorien bilden
- Fachspezifische Modelle und Verfahren charakterisieren, auswählen und zur Untersuchung von Sachverhalten nutzen
- Erkenntnisprozesse und Ergebnisse interpretieren und reflektieren" (KMK 2020, S. 16)

Diese Bildungsstandards werden in den einzelnen Ländern in den Kernlehrplänen konkretisiert. Im Folgenden wird dies am Beispiel des Kernlehrplans für Nordrhein-Westfalen exemplarisch vorgestellt, da es sich bei der Universität Paderborn, die der Erhebungsstandort dieses Projektes ist, eher um eine Regional-Universität handelt, ein Großteil der Studierenden also aus dem direkten Umland stammt. Studienanfänger:innen haben dementsprechend Physikunterricht auf Basis dieses Kernlehrplans erlebt.

Im Kernlehrplan Physik für Nordrhein-Westfalen wird der Stellenwert des Experimentes noch deutlicher als in den Bildungsstandards herausgestellt, indem dem Experiment "eine zentrale Bedeutung für die naturwissenschaftliche Erkenntnismethode und somit auch eine zentrale Stellung im Physikunterricht" (Kernlehrplan Sekundarstufe I, S. 9) zugeschrieben wird. Im Kernlehrplan für die Sekundarstufe II wird festgeschrieben, dass besonders "[...] der Unterricht [im Grundkurs] auf der experimentellen Methode [basieren soll], da diese den besonderen Charakter der Physik als empirische Wissenschaft verdeutlicht." (Kernlehrplan Sekundarstufe II, S. 14). Die Schüler:innen sollen am Ende der Sekundarstufe II "[...] zunehmend Fähigkeiten zum selbstständigen Arbeiten an physikalischen Problemstellungen und Erkenntnisprozessen." (Kernlehrplan Sekundarstufe II, S. 14) erworben haben. Während in Nordrhein-Westfalen im Grundkurs vorrangig Schlüsselexperimente[16] fokussiert werden, sollen im Leistungskurs die Inhalte und Methoden stärker vernetzt und aus verschiedenen Perspektiven beleuchtet werden.

[16] In NRW sind vom Landesinstitut für Schule für Grundkurse 25 sogenannte Schlüsselexperimente festgelegt worden, mit denen sich "die wesentlichen Inhalte für den Grundkurs erschließen lassen" (Qualitäts- und UnterstützungsAgentur - Landesinstitut für Schule 2022)

Für den Kompetenzbereich *Erkenntnisgewinnung* werden die in der Sekundarstufe II zu erwerbenden Fähigkeiten und Fertigkeiten in Bezug auf das Experimentieren dementsprechend auch noch deutlicher ausdifferenziert:

- "Physikalische Probleme identifizieren, analysieren und in Form physikalischer Fragestellungen präzisieren,
- kriteriengeleitet beobachten und messen sowie auch komplexe Apparaturen für Beobachtungen und Messungen erläutern und sachgerecht verwenden,
- Hypothesen deduktiv generieren sowie Verfahren zu ihrer Überprüfung ableiten,
- Experimente auch mit komplexen Versuchsplänen und Versuchsaufbauten mit Bezug auf ihre Zielsetzungen erläutern und diese zielbezogen unter Beachtung fachlicher Qualitätskriterien durchführen,
- Daten qualitativ und quantitativ im Hinblick auf Zusammenhänge, Regeln oder mathematisch zu formulierende Gesetzmäßigkeiten analysieren und Ergebnisse verallgemeinern,
- Modelle entwickeln sowie physikalisch-technische Prozesse mithilfe von theoretischen Modellen, mathematischen Modellierungen, Gedankenexperimenten und Simulationen erklären oder vorhersagen,
- naturwissenschaftliches Arbeiten reflektieren (u. a. Zielorientierung, Sicherheit, Variablenkontrolle, Kontrolle von Störungen und Fehlerquellen) sowie Veränderungen im Weltbild und in Denk- und Arbeitsweisen in ihrer historischen und kulturellen Entwicklung darstellen." (Kernlehrplan NRW Physik Sekundarstufe II, S. 15)

Die Erreichung der Bildungsstandards des Kompetenzbereichs *Erkenntnisgewinnung* für die Sekundarstufe I wird in Deutschland mittels des IQB-Ländervergleichs überprüft. Grundlage für die empirische Prüfung ist das *Rahmenmodell für den Kompetenzbereich Erkenntnisgewinnung* (Mayer 2007, S. 177). Das Modell basiert wie auch die in den Bildungsstandards definierten Learning Outcomes für den physikalischen Unterricht auf dem Ansatz des *scientific literacy*. Die Learning Outcomes können jeweils einer der drei Dimensionen zugeordnet werden: Charakteristika der Naturwissenschaften (*Nature of Science*), wissenschaftliche Erkenntnismethoden (*scientific inquiry*) sowie praktische Arbeitstechniken (*practical*

skills). Das Kompetenzstrukturmodell, das für die Erstellung des Instrumentes genutzt wird, besteht aus drei Dimensionen: *Kompetenzbereiche*, *Komplexität* und *kognitive Prozesse*. Die Dimension *Kompetenzbereiche* besitzt drei Teilfacetten: Naturwissenschaftliche Untersuchung, Naturwissenschaftliche Modellbildung und Wissenschaftstheoretische Reflexion.

Die Facette *Wissenschaftstheoretische Reflexion* ist im Rahmenmodell für den Kompetenzbereich *Erkenntnisgewinnung* der Dimension *Charakteristika der Naturwissenschaften* (*Nature of Science*) zuzuordnen. Diese Facette umfasst dementsprechend vorrangig epistemologische Überzeugungen (u. a. Institut zur Qualitätsentwicklung im Bildungswesen 2011, Mayer 2007, L. Arndt u. a. 2020) zum Wissenschaftsverständnis, die dem Konstrukt *Nature of Science* zuzuordnen sind.

McComas, Clough und Almazroa 2002 definieren das Konstrukt *Nature of Science* (NOS) als:

> "The nature of science is a fertile hybrid arena which blends aspects of various social studies of science including the history, sociology, and philosophy of science combined with research from the cognitive sciences such as psychology into a rich description of what science is, how it works, how scientists operate as a social group and how society itself both directs and reacts to scientific endeavors." (McComas, Clough und Almazroa 2002, S. 4)

Nature of Science ist dementsprechend als multidimensionales Konstrukt anzusehen, das sich damit auseinandersetzt, was das Wesen der Naturwissenschaften ausmacht (Produktebene, Nature of Science) und wie dieses zustande kommt (Prozessebene, Nature of Science Inquiry) (I. Neumann 2011, I. Neumann und Kremer 2013, L. Arndt u. a. 2020). Die Aspekte dieses Konstruktes sind bisher noch nicht systematisch (Billion-Kramer u. a. 2020), sondern eher ausschnitthaft und implizit in den Kernlehrplänen integriert worden (I. Neumann 2011)[17].

Mit Blick auf die nationalen Bildungsstandards kann festgehalten werden, dass Schüler:innen im Sinne einer Allgemeinbildung (scientific literacy) ein angemessenes Wissenschaftsverständnis (kognitiv-epistemische Überzeugungen) erwerben sollen. Konkret bedeutet dies:

> "Schülerinnen und Schüler sollen über Kenntnisse naturwissenschaftlicher Inhalte und Methoden verfügen, damit sie Möglichkeiten und Grenzen naturwissenschaftlichen Wissens und Handelns reflektieren können. Dabei beinhaltet diese Reflexion nicht nur naturwissenschaftliches Fachwissen, sondern auch erkenntnis- und wissenschaftstheo-

[17] Überblicksartikel zum Konstrukt *Nature of Science*: Review von Abd-El-Khalick und Lederman 2000, McComas 2002 oder auch die Dissertation von I. Neumann 2011.

> retisches sowie wissenschaftshistorisches und -soziologisches Wissen (Hößle et al. 2004), für einen handelnden Umgang mit Naturwissenschaft im Sinne einer gesellschaftlichen Teilhabe und Meinungsbildung." (Billion-Kramer u. a. 2020, S. 55)

Folgt man dieser Definition, dann stellt die Dimension Charakteristika der Naturwissenschaften (*Nature of Science*) des Rahmenmodells für den Kompetenzbereich *Erkenntnisgewinnung* eine Reflexionsebene für die Dimensionen *wissenschaftliche Erkenntnismethoden* (*scientific inquiry*) sowie *praktische Arbeitstechniken* (*practical skills*) dar. Auf Basis der handelnden Auseinandersetzung mit physikalischen Phänomenen z. B. durch Experimentieren, durch den Nachvollzug historischer Experimente oder durch theoretische Modellbildungen sollen Schüler:innen ein Grundverständnis darüber erwerben, wie physikalische Evidenzen entstehen und welche Charakteristika wissenschaftliche Forschung ausmachen. Minimalkonsenslisten aller theoretischen Konstrukte des *Nature of Science* in der fachdidaktischen Forschung[18] betonen u. a. Aspekte wie Wissen über die Bedeutung von Kreativität und Subjektivität für wissenschaftliche Erkenntnis, Wissen über die Veränderung wissenschaftlicher Erkenntnisse im Laufe der Zeit und Wissen über die Differenzierung zwischen Beobachtung und Schlussfolgerung (Billion-Kramer u. a. 2020, S. 57).

Schüler:innen sollen dementsprechend durch den Physikunterricht keine Handlungsressourcen in dem Sinne erwerben, so dass sie selbst experimentell forschend tätig sein können (u. a. Höttecke und Rieß 2015, Schreiber 2012), sondern vielmehr durch die handelnde Auseinandersetzung mit physikalischen Inhalten auf einer höheren Abstraktionsebene Wissen über die Grundprinzipen physikalischer Erkenntnisgewinnung erwerben. Dazu gehört im Sinne des Minimalkonsens, dass sie Vorstellungen dazu erwerben, welche Formen des Experimentierens existieren (*context of justification* versus *context of discovery*), wie Forscher:innen den Experimentierprozess beeinflussen (unterschiedliche Formen des Schließens (Deduktion, Induktion, Abduktion) sowie die Rolle der Kreativität beim gesamten Prozess) und wann Schlussfolgerungen empirisch gültig und plausibel sind.

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass in den Bildungsstandards und Kernlehrplänen zwar handlungsorientierte Learning Outcomes im Sinne von *scientific inquiry* und *practical skills* für das Experimentieren festgelegt werden. Diese müssen jedoch vor dem Hintergrund des Bildungsanspruchs (scientific literacy) interpretiert werden. Es sollen dementsprechend durch den handelnden Umgang mit physikalischen Inhalten kognitive Ressourcen erworben und für den Erwerb eines adäquaten Wissenschaftsverständnisses hinsichtlich der Charakteristika wissenschaftlicher Forschung (Nature of Science) reflektiert werden.

[18] An dieser Stelle wird darauf verzichtet, unterschiedliche Konstrukte in der *Nature of Science*-Forschung zu diskutieren. Hier bietet z. B. der Beitrag von Arndt et. al (2020) einen guten Einstieg.

2.2.2. Didaktische Funktion und Einbettung von Experimenten in der Schule

Nach Analyse der Zielsetzung des schulischen Experimentierens soll nachfolgend als Vorbereitung auf die Analyse der experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten von Schüler:innen auf Abiturniveau diskutiert werden, welche didaktischen Funktionen Experimente im Schulunterricht besitzen und wie diese eingebettet werden können. Lehrer:innen haben in Bezug auf die Erreichung der Zielsetzungen, die mit dem Experimentieren in der Schule verbunden sind, große Freiheiten hinsichtlich (a) der Funktion des Experimentierens und (b) der Organisationsform. Die Freiheitsgrade werden jedoch durch (c) diverse Rahmenbedingungen limitiert.

Experimente besitzen im Physikunterricht eine große Spannbreite an Funktionen (u. a. Kircher, Girwidz und Fischer 2020, Reinhold, Lind und Friege 1999, Muckenfuß 1995). Lehrer:innen setzen Experimente abhängig von z. B. psychologischen (Motivation, Interesse) über erkenntnistheoretischen (Nature of Science) bis hin zu fachlichen Funktionen (Visualisierung Phänomene) ein. Je nach gewähltem Lernziel werden Experimente als Einstieg in Themenfelder oder zur Sicherung dieser, zur Illustration von behandelten Inhalten oder zum Erlernen experimenteller Fähigkeiten eingesetzt. Die Studie von Tesch und Duit (2004) zeigte, dass hauptsächlich die Funktion *Visualisieren von Phänomenen und Gesetzmäßigkeiten* im Unterricht dominiert. Das Experimentieren als Erkenntnismethode bzw. die Vermittlung von wissenschaftslogischen Zusammenhängen (Nature of Science) wird in der Mittelstufe quasi nicht unterrichtet (Tesch und Duit 2004). An dieser Stelle ist aufgrund fehlender Studien mit Fokus auf die Sekundarstufe II offen, ob z. B. in den Leistungs- und Grundkursen diese Funktion von Experimenten häufiger fokussiert wird. Aufgrund dieser großen Diversität an Funktionen und den damit verbundenen Lernzielen von Experimenten gibt es keine einheitliche bzw. konsensfähige Definition für Experimentieren in der Schule (Schreiber 2009, Emden 2011, Höttecke und Rieß 2015).

Ein weiterer Freiheitsgrad im Einsatz von Experimenten im Unterricht stellt für Lehrer:innen die Wahl der Organisationsform dar. Abhängig vom konkreten Einsatz der Experimente im Physikunterricht wird zwischen Demonstrationsexperimenten, die oftmals durch die Lehrer:innen durch- und damit vorgeführt werden, sowie Schülerexperimenten, bei denen das Experimentieren hauptsächlich von den Schüler:innen in Einzel- oder Gruppenarbeit stattfindet, unterschieden. Weiterhin kann der Öffnungsgrad der experimentellen Phasen zwischen offenem Experimentieren (minimale Vorgaben) und eng angeleitetem Experimentieren (Kochrezeptanleitung) variieren. Hauptsächlich werden hypothetisch-deduktive Experimente durchgeführt, die zur Bestätigung von Hypothesen dienen (Tesch und Duit 2004) und dementsprechend im *context of justification* einzuordnen sind. Offene Experimentieraufgaben, die oftmals mit dem Ansatz des forschenden Lernens kombiniert werden und den Schüler:innen an allen Punkten des

Experimentierprozesses Entscheidungsmöglichkeiten bieten, sind eher dem *context of discovery* zuzuordnen. Hier sei allerdings angemerkt, dass diese Form des Experimentierens in Schulen aufgrund der limitierenden Randbedingungen kaum eingesetzt wird, auch wenn diese Form des Experimentierens aufgrund der vertieften Auseinandersetzung mit den Inhalten wegen des höheren Grades an Selbstständigkeit bei Entscheidungsprozessen eine höhere Lernwirksamkeit verspricht.

Die Rahmenbedingungen stellen limitierende Faktoren beim Einsatz von Experimenten im Physikunterricht dar: Neben der Ausstattung der Physiksammlungen in den Schulen, den zeitlichen Ressourcen der Lehrer:innen, den Klassengrößen, der Unterrichtszeit (Physik ist außer bei Wahl des Leistungskurses ein Nebenfach) sowie der Gruppendynamik bzw. dem Alter der Schüler:innen spielen hier auch die Ausbildung der Lehrer:innen im Bereich der experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten und damit verbunden das Fähigkeitsselbstkonzept der Lehrer:innen eine zentrale Rolle dafür, auf welche Art und Weise Experimente im Unterricht eingesetzt werden. Laut einer Interviewstudie mit Lehrer:innen von Labudde (2000) sind "Einfachheit und Transparenz, Stützung des Lernprozesses sowie die Einschränkungen/Möglichkeiten der Physiksammlung" (Labudde 2000, S. 354) die dominierenden Aspekte beim Einsatz von Experimenten.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass sich der Einsatz von Experimenten im Physikunterricht aufgrund der vielfältigen Zielsetzungen, Freiheitsgrade bzw. Limitationen sehr komplex gestaltet. Lehrer:innen können abhängig von ihren persönlichen Präferenzen oder den Rahmenbedingungen auf Experimente verzichten, nur Demonstrationsexperimente vormachen oder Schülerexperimente einsetzen. Bezüglich der konkreten Unterrichtsgestaltung und damit verbunden dem Erreichen der Lernziele ist eine eher heterogene Fähigkeitsverteilung in Bezug auf experimentelle Fähigkeiten und Fertigkeiten bei Schüler:innen zu vermuten.

2.2.3. Lernwirksamkeit von Experimentieren in der Schule

In diesem Kapitel wird nach Analyse der Zielsetzungen, didaktischen Funktion und Einbettung von Experimenten in der Schule der Frage nachgegangen, welche experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten bei Schüler:innen am Ende der gymnasialen Oberstufe erwartbar sind. An dieser Stelle stellt es eine Herausforderung dar, dass bisher kaum größere quantitative Studien zu den experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten von Oberstufenschüler:innen oder Studienanfänger:innen durchgeführt wurden. Aktuell ist also nicht klar, mit welchen experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten Studierende ihr Physikstudium beginnen. Im Folgenden wird deswegen für die Entwicklung eines Überblicks sowie für das Treffen von Tendenzaussagen auf Ergebnisse aus den wenigen Studien aus Deutschland, aus internationalen Large-Scale Studien sowie auf Ergebnisse aus Studien zu

Untersuchungen in der Mittelstufe zurückgegriffen.

Hinsichtlich der Häufigkeit des Einsatzes von Experimenten im Schulunterricht zeigt die Studie von Tesch und Duit (2004), dass im Mittel rund zwei Drittel der Unterrichtszeit (64%) in der Mittelstufe durch Experimente beeinflusst werden, obwohl die eigentliche Experimentierzeit lediglich 28% umfasst. Diese Befunde wurden auch ein Jahrzehnt später in einer internationalen Studie von Börlin und Labudde (2014) bestätigt (Börlin und Labudde 2014) und decken sich mit dem bildungspolitischen Anspruch, dass das Experimentieren eine zentrale Rolle im Physikunterricht besitzt.

Die Lernwirksamkeit von Experimenten im Physikunterricht wird seit den 1930er Jahren ausgehend vom anglo-amerikanischen Raum kontrovers diskutiert (u. a. Lunetta, Hofstein und Clough 2007, K. Neumann 2004, Hodson 1993). Verschiedene Studien kommen zu dem Schluss, dass die experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten von Schüler:innen unzureichend ausgebildet werden (Überblick: Hodson 1993). Im Verlauf des Diskurses konnte kein Konsens zur Lernförderlichkeit von Experimenten im Unterricht gebildet werden (Welzel und Haller 1998, S. 29). Ein Erklärungsansatz dafür ist, dass die mit dem Experimentieren verbundenen Ziele bzw. Funktionen nicht mit den im Physikunterricht eingesetzten Aufgabenstellungen und Organisationsformen erreicht werden können (Lunetta, Hofstein und Clough 2007, Lunetta und Tamir 1979, Woolnough und Allsop 1985, Hofstein und Lunetta 1982, Hodson 1993). Als neuralgischer Punkt und als Vermittler zwischen den Zielen und der Organisationsform wurden hier die experimentellen Aufgabenstellungen identifiziert. Aufgabenstellungen sind ein elementarer Bestandteil der Unterrichtsgestaltung durch Lehrer:innen. Im Folgenden werden die Evidenzen zur Wirksamkeit von Experimenten auf (a) der Ebene der institutionellen Rahmenbedingungen, auf (b) der Ebene der Lehrer:innenausbildung sowie auf (c) der Ebene der Unterrichtsgestaltung diskutiert.

Im Rahmen der internationalen Large-Scale Vergleichsstudie TIMSS/III, die auf dem Konzept *scientific literacy* basiert, wurden für die voruniversitäre Physik auch die experimentellen Fähigkeiten von Oberstufenschüler:innen aus Deutschland erhoben. Im Abschlussbericht ist festgehalten worden, dass "deutsche Schulabsolventen [...] – vermutlich unterrichts- und weniger lehrplanbedingt – tendenziell mit größeren Schwierigkeiten bei Aufgabenstellungen konfrontiert [sind], die komplexe Operationen, die Anwendung mathematischer oder naturwissenschaftlicher Modellvorstellungen und selbstständiges fachliches Argumentieren verlangen." (Baumert, Bos, Brockmann u. a. 2000, S. 26). Dies wird daraus abgeleitet, dass die gestellten Aufgaben von den "Lehrplanexperten der Bundesländer" (Baumert, Bos, Brockmann u. a. 2000, S. 47) als curricular valide eingeschätzt wurden, was dafür spräche, dass an Schulen die Vorgaben der Lehrpläne nicht vollständig umgesetzt wurden (Baumert, Bos, Brockmann u. a. 2000, S. 26). Dies ist vor dem Hintergrund plausibel, dass die Lernziele zwar sehr ausdifferenziert sind, Leh-

rer:innen bei der Unterrichtsgestaltung, wie in Kap. 2.2.2 gezeigt, trotzdem einen sehr hohen Freiheitsgrad in der Gestaltung des Unterrichts besitzen. Séré (2002) hat in diesem Zusammenhang eine vergleichende Studie zu der experimentellen Ausbildung an Schulen in verschiedenen europäischen Staaten durchgeführt. Sie kommt zu dem Schluss, dass die Zielsetzungen, die mit dem Experimentieren in der Schule verbunden sind, zu zahlreich und umfassend sind, als dass sie im Unterricht alle sinnstiftend behandelt werden könnten (Séré 2002). Sie fordert von den Lehrplanentwickler:innen und Lehrer:innen, eine sinnvolle (umsetzbare) Auswahl an Zielen für das experimentelle Arbeiten zu treffen (Séré 2002). In diesem Zusammenhang muss auch angeführt werden, dass die Erkenntnismethodik Experimentieren in ihrer Komplexität an Schulen kaum "lehrbar" ist (Hodson 1993). Es muss sich auf der Ebene der institutionellen Rahmenbedingungen (a) zukünftig grundsätzlich gefragt werden, was genau Schüler:innen lernen müssen, um ihnen einerseits im Sinne des Bildungsanspruchs von Schule gesellschaftliche Teilhabe zu ermöglichen und sie andererseits auf ein naturwissenschaftliches Studium vorzubereiten.

Neben den Zielsetzungen stellt auf der Ebene der institutionellen Rahmenbedingungen (a) vermutlich auch die Gestaltung der Überprüfung der Leistungen der Schüler:innen einen Einfluss auf die Gestaltung von experimentellen Lehr-Lernumgebungen dar. Im Kapitel 2.2.2 ist deutlich geworden, dass die Funktion von Experimenten im Physikunterricht vor allem vom *Visualisieren von Phänomenen und Gesetzmäßigkeiten* dominiert wird. Das Fach Physik ist bis zur Oberstufe meist ein Nebenfach. In Nebenfächern werden Noten oftmals auf Basis von Tests, in denen Fachwissen abgefragt wird, sowie durch die aktive Beteiligung im Unterricht vergeben. In der Oberstufe schreiben die Schüler:innen, die Physik nicht abgewählt haben, Klausuren, die neben der Abfrage von Fachwissenselementen auch Aufgabenstellungen zur Analyse und Interpretation von durchgeführten Experimenten umfassen. Der Einsatz und damit verbunden die von den Lehrer:innen dem Experiment zugewiesenen Funktionen und Ziele sind vermutlich abhängig von der Form der Leistungskontrolle. Praktische Prüfungen im Sinne eines *performance assessments* sind in Deutschland bisher nur in Niedersachsen (seit 2009) als optionaler Teil der Abiturprüfung implementiert worden.[19] Eine Begleitstudie von Barth (2014) zeigte, dass Lehrer:innen dann bei der Unterrichtsgestaltung einen stärkeren Fokus auf die experimentelle Methode legen (Barth 2014). Weiterhin war zu beobachten, dass der Anteil der schülerzentrierten Arbeitsphasen stieg, während die lehrerzentrierten Phasen abnahmen. Folgt man der Argumentation des Ansatzes *learning for the test*, dann ist zu vermuten, dass auch in der Oberstufe in den Bundesländern, in denen keine Experimentalprüfungen angeboten werden, der Einsatz und auch die damit verbundenen Schwierigkeiten nicht deutlich von der für die Mittelstufe berichteten Realität abweichen.

[19] Im internationalen Raum, besonders in den USA, ist diese Prüfungsform weiter verbreitet (Shavelson und Baxter 1991).

An dieser Stelle wird für die Betrachtung der Lernwirksamkeit von Experimentieren (b) die Ebene der Lehrer:innenausbildung im Rahmen des Studiums relevant. Während ihres Studiums lernen angehende Lehrer:innen typischerweise in Laborpraktika oder didaktischen Seminaren mit Fokus auf Experimentierumgebungen vor allem die vorgefertigten experimentellen Aufbauten inklusive kleinschrittiger Anleitungen von Lehrmittelfirmen kennen. Die wenigsten angehenden Lehrer:innen schreiben ihre Qualifikationsarbeiten im Fach Physik und sammeln somit keinerlei Erfahrung mit der Komplexität der experimentellen Methode im Forschungsprozess. Die Aspekte über die Natur der Erkenntnismethodik des Experimentierens werden in Laborpraktika von Fachwissenschaftler:innen eher implizit vermittelt (Schecker, Fischer und Wiesner 2004, Höttecke 2001). Höttecke (2001) stellte weiterhin fest, dass nur wenige Studien zu *Nature of Science*-Aspekten mit Lehrer:innen durchgeführt wurden. Die wenigen Studien, die gemacht wurden, zeigen, dass Lehramtsstudierende und Lehrer:innen erhebliche Wissensdefizite und ein inadäquates Wissenschaftsverständnis aufweisen. In fachdidaktischen Lehrveranstaltungen werden Aspekte von *Nature of Science* neben diversen anderen Themen punktuell in einzelnen Veranstaltungen im Verlauf des Studiums vermittelt. Hier kann also mit Blick auf die von der Bildungspolitik intendierten Lernziele mit Fokus auf das Experimentieren von einer Professionalisierungslücke im Bereich des fachdidaktischen Wissens (PCK)[20] sowie im Fachwissen (CK) gesprochen werden (Höttecke 2001, international auch Tobin 1990, Hodson 1993, Hofstein und Lunetta 1982).

Resultat dieser Ausbildung ist, dass angehende Lehrer:innen, sobald sie an die Schulen gehen und dort eher mangelhaftes bzw. zu überarbeitendes Experimentiermaterial vorfinden, aufgrund der fehlenden Wissensressourcen und Strategien handlungsunfähig sind. Dies zeigt sich oftmals in einem Bedürfnis nach Sicherheit, d. h. einem hohen Maß an Planbarkeit und einem Bedürfnis nach einer möglichst exakten Reproduktion eines physikalischen Phänomens, um beim Nichtfunktionieren bzw. durch abweichende Ergebnisse vor den Schüler:innen nicht in Erklärungsnöte zu kommen (Höttecke und Rieß 2015). Dies hat bedeutende Auswirkungen auf die Lernwirksamkeit von Experimenten. Den Schüler:innen wird suggeriert, dass Experimente nur dann erfolgreich sind, wenn ein möglichst exaktes Ergebnis erreicht wird (Hammann u. a. 2008, Schauble, Klopfer und Raghavan 1991). Es wird damit ein unrealistisches Bild von Experimentieren als Erkenntnismethodik transportiert, das nicht das hohe Maß an Unsicherheit, an Optimierungen sowie durch die Komplexität der interagierenden physikalischen Inhalte, Materialien und dem Bedienen der Geräte gekennzeichnet ist. Vor dem Hintergrund, dass vor allem unvorhergesehene Situationen, die nicht

[20] Die für die Professionalisierung relevanten Bereiche des Lehrerwissens wurden besonders durch die Arbeiten von Shulman 1986 und Bromme 1992 definiert und systematisiert. Es werden dabei verschiedene Wissensbereiche unterschieden. Unter Content Knowledge (CK) werden fachliche Wissensressourcen und unter PCK Pädagogisches Inhaltswissen auch Pedagogical content knowledge (PCK) verstanden.

sofort zu erklären sind, Anlässe zur tiefer gehenden Auseinandersetzung mit den physikalischen und technischen Aspekten bieten und damit Potenzial für einen elaborierteren Fähigkeitserwerb im Bereich des Experimentierens oder über die Natur der Naturwissenschaft darstellen, birgt der diskutierte Aspekt die Möglichkeit, die Lernwirksamkeit von Experimenten im Physikunterricht zu erhöhen (Baur 2018, Emden und Baur 2016, Oser, Hascher und Spychiger 1999).

Schecker, Fischer und Wiesner (2004) führen auf (b) der Ebene der Lehrer:innen-Ausbildung als weitere Erklärung für die geringe Lernwirksamkeit von Experimenten im Schulunterricht an, dass in Schulen keine horizontalen und vertikalen Vernetzungen innerhalb der Lerninhalte geschaffen werden. Lernen in der Physik ist eher additiv und nicht kumulativ angelegt, was sich vor allem in den Leistungen der Schüler:innen auf höheren Komplexitätsniveaus (Transfer) zeigt. Emden und Baur (2016) führen weiterhin an, "dass das Wesen des Experimentierens häufig eher psychomotorisch und seltener epistemologisch [...]" (Emden und Baur 2016, S. 8) charakterisiert ist. Laut Schecker et al. (2004) findet in der Regel keine "angemessene wissenschaftstheoretische Diskussion über die Rolle des Experimentes" (Schecker, Fischer und Wiesner 2004, S. 35) statt und "naive Sichtweisen werden nicht korrigiert." (ebd.). In diesem Zusammenhang weisen Höttecke und Rieß darauf hin, dass "[...] Nature of Science und die Prozesshaftigkeit bzw. Materialität von Forschungsprozessen [...] kaum systematisch berücksichtigt [...]" (Höttecke und Rieß 2015, S. 136) sowie nur implizit und unreflektiert vermittelt werden (Höttecke 2001). Hodson spricht in diesem Zusammenhang von einem "hidden curriculum" (Hodson 1993, S. 112), sodass abhängig von der Professionalisierung der Lehrer:innen die Einbettung von Nature of Science - Aspekten unterschiedlich ausfällt.

Auf (c) der Ebene der Unterrichtsgestaltung ist in Bezug auf die Lernwirksamkeit von Experimenten vor allem die Gestaltung der experimentellen Aufgabenstellungen relevant. Klassische experimentelle Aufgabenstellungen im Physikunterricht sind meist hypothetisch-deduktiv angelegt (Krüger und Upmeier zu Belzen 2021) und besitzen einen hohen Instruktionsgrad, sodass sie dem *context of justification* zuzuordnen sind (Tesch und Duit 2004, Börlin und Labudde 2014). Jiang et al. konnten anhand einer Metaanalyse der PISA Daten von 2006 zeigen, dass Experimentieraufgaben mit einem hohen Instruktionsgrad mit rund 40% den Unterricht dominieren (Jiang und McComas 2015). Hoher Instruktionsgrad bei Experimentieraufgaben bedeutet, dass alle experimentell zu absolvierenden Schritte nach dem klassischen Schema Planung, Durchführung und Auswertung vorstrukturiert und mit kleinteiligen, schrittweisen Anweisungen zur Bewältigung der Aufgabenstellung versehen sind. Diese Form der Aufgabenstellungen, die in Schulbüchern und auch von Lehrmittelfirmen bereitgestellt werden, mindert den Betreuungsaufwand während des Experimentierens und ermöglicht es den Lehrer:innen so, auch mit großen Gruppengrößen schülerorientiert zu experimentieren. Auch Demonstrationsexperimente werden typischerweise mittels dieser Struktur präsentiert

und von den Schüler:innen dokumentiert. Ziel ist, den Schüler:innen die Struktur des Experimentierens idealtypisch beizubringen und ihnen so ein Hilfsgerüst für das Absolvieren von Experimenten an die Hand zu geben.

Die vorgegebene Struktur (Planung, Durchführung, Auswertung) wird nach Auffassung einiger Forscher:innen geradezu indoktriniert und dient eher der Verifikation von bekannten Vorannahmen als dem Experimentieren (Clough 2006, Hofstein und Lunetta 2004, Nott und Wellington 1996). Weiterin suggeriert sie eine Linearität der Erkenntnismethodik des Experimentierens, die in dieser Form sehr weit von der Realität entfernt ist (u. a. Höttecke und Rieß 2015). Schüler:innen werden dadurch inkorrekte Präkonzepte vermittelt, die die Vermittlung von Wissensressourcen und Ausbildung epistemologischer Überzeugungen im Bereich der Aspekte des Konstruktes *Nature of Science* behindert (u. a. Lunetta, Hofstein und Clough 2007, Hofstein und Lunetta 1982). Schecker et al. formulieren dazu für die Oberstufe, dass "das Bild von der Naturwissenschaft Physik bei Schülern [...] defizitär ist" (Schecker, Fischer und Wiesner 2004, S. 29).

Resultat davon ist, dass die Schüler:innen die Experimente nicht auf physikalischer Ebene (Lunetta, Hofstein und Clough 2007, Hucke 2000) durchdenken, da sie lediglich den vorgegebenen zumeist praktisch-manuellen Schritten folgen. Ein elaborierter Erwerb von Wissensressourcen bzw. die Ausbildung epistemologischer Überzeugungen mit Fokus auf die Erkenntnismethodik Experimentieren findet kaum statt. Dies zeigt sich auch in den Daten der internationalen Large-Scale Vergleichsstudie TIMSS/III, die auf dem Konzept *scientific literacy* basiert. Die Leistungen von Oberstufenschüler:innen in Bezug auf die physikalischen Fähigkeiten und Fertigkeiten lagen im Mittelfeld, wobei "[...] die untersten Fähigkeitsniveaus überbesetzt und die beiden obersten Fähigkeitsniveaus deutlich unterbesetzt" (Baumert, Bos, Brockmann u. a. 2000, S. 26) sind. Hauptschwierigkeiten von Oberstufenschüler:innen im Bereich des Experimentierens liegen beim "selbstständigen fachlichen Argumentieren und vertieften begrifflichen Verständnis" (Schecker, Fischer und Wiesner 2004, S. 35). Dies führt dazu, dass die Schüler:innen im Leistungskurs Schwierigkeiten haben, ihre Wissensressourcen unabhängig vom Kontext anzuwenden (Transferbereich). Schüler:innen im Grundkurs zeigen schon beim Anwenden gelernter Fachinhalte Defizite (Schecker (2004) nach Baumert, Bos und Watermann 2000).

Als Fazit kann festgehalten werden, dass es einen generellen Unterschied zwischen Schulexperimenten und Forschungsexperimenten gibt (u. a. Höttecke und Rieß 2015). Muckenfuß formulierte dazu: "Experimentieren im Unterricht [...] [ist] nicht identisch mit dem Anstellen oder Nachbilden eines wissenschaftlichen Experiments im klassischen Sinne" (Muckenfuß 1995, S. 337). Experimentieren im Schulunterricht ist dementsprechend im *context of justification* zu verorten. Schüler:innen sollen beim Experimentieren durch die handelnde Auseinandersetzung mit der Natur vorrangig konzeptuelles Wissen aus dem Kompetenzbereich

Erkenntnisgewinnung erwerben. Experimente sind dementsprechend vorwiegend hypothetisch-deduktiv angelegt (Krüger und Upmeier zu Belzen 2021). Lehrer:innen besitzen einerseits diverse Freiheitsgrade beim Einsatz von Experimenten im Physikunterricht, die andererseits stark durch äußere Rahmenbedingungen limitiert werden. Das Resultat sind oftmals die Durchführung von Demonstrationsexperimenten oder das Abarbeiten von engmaschigen Experimentieranleitungen. Die Schüler:innen werden dadurch im Bereich der psychomotorischen Fähigkeiten und Fertigkeiten jedoch nur selten in der elaborierten Auseinandersetzung mit den physikalischen Inhalten oder der Methodik des Experimentierens gefördert. Weiterhin haben Lehrer:innen meist kaum Erfahrungen mit dem physikalischen Forschungsprozess und können dementsprechend die Aspekte des Konstruktes *Nature of Science* kaum bzw. gar nicht vermitteln, sodass im Unterricht naive Vorstellungen zum Forschungsprozess, die bei den Schüler:innen vorliegen und u. a. durch die vorgegebene Linearität des Experimentierprozesses noch verstärkt, nicht korrigiert und stattdessen nicht funktionale Prozessmerkmale eingeübt werden.

2.2.4. Fazit

Der Bildungsanspruch von Schulen stellt die Vermittlung von naturwissenschaftlicher Bildung im Sinne von *scientific literacy* dar. Schüler:innen sollen eine naturwissenschaftliche Bildung erhalten, die sie befähigt gesellschaftliche Debatten auf Basis eines grundlegenden Verständnisses der Natur der Naturwissenschaften (Nature of science) zu verfolgen, sich zu beteiligen und sich eine fundierte Meinung zu bilden. Die Vermittlung von *scientific literacy* stellt sich jedoch aufgrund einer hohen Anzahl an Lernzielen, diversen Funktionen von Experimenten sowie hohen Freiheitsgraden und Limitationen beim Einsatz von Experimenten im Unterricht als komplex und herausfordernd dar.

Klassische experimentelle Aufgabenstellungen weisen in der Schule einen hohen Instruktionsgrad auf, der die Lernwirksamkeit von experimentellen Lehr-Lernumgebungen deutlich senkt und dafür sorgt, dass nicht-funktionale Wissensressourcen in Bezug auf die Erkenntnismethodik Experimentieren vermittelt werden. Für Universitäten bedeutet dies, dass nicht davon ausgegangen werden kann, dass die für die Oberstufe definierten Learning-Outcomes im Bereich der *Erkenntnisgewinnung* in dem intendierten Umfang erreicht werden. Vielmehr ist im Mittel zu vermuten, dass die Schüler:innen einen grundsätzlichen Einblick in die Struktur standardisierten Experimentierens erhalten haben und damit verbunden nicht-funktionale Vorstellungen zum Experimentieren in der Wissenschaft bzw. eher unelaborierte Wissensressourcen in Bezug auf das Konstrukt *Nature of Science* aufweisen.

2.3. Experimentieren im Studium

Für die Modellierung der experimentellen Kompetenz Physikstudierender sind bisher das höchste Niveau experimenteller Fähigkeiten (Forschung) sowie das Niveau, welches Schüler:innen zu Beginn des Studiums aufweisen, analysiert worden. Im Folgenden wird die Ausbildung experimenteller Fähigkeiten und Fertigkeiten von Physikstudierenden im Rahmen ihres Studiums in Abgrenzung zur schulischen Ausbildung und zur Forschung analysiert. Studierende physikalischer Studiengänge müssen im Rahmen des Studiums mehrere Laborpraktika absolvieren. In diesem Veranstaltungsformat führen sie in unterschiedlichen Organisationsformaten sowie zu unterschiedlichen Inhaltsbereichen Experimente durch.

Zur Analyse des Experimentierens im Studium werden nachfolgend die Ziele, die mit Laborpraktika verbunden sind (Kap. 2.3.1), die didaktische Gestaltung und organisatorische Strukturen von Laborpraktika (Kap. 2.3.2), sowie die Lernwirksamkeit von Laborpraktika (Kap. 2.3.3) diskutiert.

2.3.1. Ziele von Laborpraktika

Die Diskussion um die Lernwirksamkeit von Experimenten wird auf Ebene der Hochschulen und Universitäten geführt, aufgrund der Unterschiede universitärer und schulischer Bildungsprozesse und -ziele jedoch auf universitärer Ebene in einem deutlich geringeren Umfang als im schulischen Bereich. Aufgrund wenig ausgeprägter hochschulfachdidaktischer Diskurse werden oftmals Erkenntnisse für den Schulbereich auch auf universitärer Ebene herangezogen und teilweise adaptiert. Grundsätzlich kann als Zielsetzung festgehalten werden, dass Studierende im Rahmen ihrer universitären Ausbildung beruflich befähigt werden sollen. Dies bedeutet, dass sie zu Physiker:innen ausgebildet werden, die neben den fachinhaltlichen auch die fachmethodischen Kompetenzen beherrschen sollen. Geprüft wird diese Befähigung im Rahmen der berufsqualifizierenden Qualifikationsarbeiten (Bachelor- und Masterarbeiten). Laborpraktika stellen die einzigen fachpraktischen Lehrveranstaltungen im Rahmen des Studiums dar und bieten sich dementsprechend zum Erlernen experimenteller Kompetenzen auf universitärem Niveau an. Der Fokus des hier diskutierten Projekts liegt dabei auf den Anfängerlaborpraktika, die typischerweise in den ersten vier Semestern stattfinden.

Die Frage nach den Zielsetzungen, die mit universitären Laborpraktika verbunden sind, wird in den letzten drei Jahrzehnten sowohl auf internationaler als auch nationaler Ebene diskutiert. Die Konferenz der Fachbereiche Physik (KFP), in der sich Professor:innen der Physik deutscher Universitäten zusammengeschlossen

haben, hat 2010 als Reaktion auf den Bologna-Prozess eine Handreichung für die Konzeptionierung von Bachelor- und Masterstudiengängen veröffentlicht. In diesem Dokument werden die Zielsetzungen der Studiengänge Bachelor und Master dargestellt. Hierbei ist grundsätzlich anzumerken, dass die Zielsetzungen weniger differenziert als für die Schule formuliert sind. Weiterhin sind die Zielsetzungen nicht theoretisch fundiert und auch nicht abhängig vom Ausbildungsstand, d. h. pro Semester angegeben. Weitere normative Zielsetzungen für physikalische Laborpraktika existieren in Deutschland nicht.

In Bezug auf das Experimentieren sollen die Studierenden bis zum Ende der Bachelorarbeit folgende Fähigkeiten und Fertigkeiten erworben haben:

- "Die Studierenden sind mit den Grundprinzipien des Experimentierens vertraut.
- Die Studierenden beherrschen die Bedienung der üblichen Messgeräte.
- Die Studierenden sind in der Lage, moderne Messmethoden anzuwenden.
- Die Studierenden kennen die Funktionsweise und Genauigkeit verschiedener Messgeräte.
- Die Studierenden sind mit der computergestützten Messdatenerfassung vertraut.
- Die Studierenden können Messdaten richtig interpretieren.
- Die Studierenden können angemessene Fehlerabschätzungen ausführen und beherrschen die Berechnung der Fehlerfortpflanzung.
- Die Studierenden sind mit der Anpassung von Funktionen an Messdaten (lineare Regression, Fitprozeduren etc.) vertraut.
- Die Studierenden beherrschen die saubere und vollständige Protokollierung von Messdaten.
- Die Studierenden sind in der Lage, Messergebnisse in tabellarischer und graphischer Form übersichtlich darzustellen.
- Die Studierenden haben die Anwendung von theoretischen Grundlagen auf konkrete Experimente geübt.
- Die Studierenden haben eine anschauliche Vorstellung physikalischer Phänomene in dem Gebiet erworben und sind in der Lage, in anschaulicher Weise

> über physikalische Sachverhalte des Gebietes zu kommunizieren." (Empfehlung der Konferenz der Fachbereiche Physik 2010, S. 8)

Verglichen mit den Zielsetzungen der Sekundarstufe II an Schulen weisen die Zielsetzungen der KFP trotz des anderen Bildungsanspruches der universitären Bildung deutliche Übereinstimmungen auf. Unterschiedlich ist lediglich der Abstraktionsgrad der Ziele sowie die verwendeten Begrifflichkeiten: Während die Ziele für die Sekundarstufe II eher abstrakt formuliert sind und dementsprechend den Lehrer:innen einen größeren Spielraum bei der Interpretation lassen, werden in den Zielsetzungen der KFP die konkret zu erwerbenden Fähigkeiten beschrieben. Bei den Zielsetzungen der KFP liegt aufgrund der Anzahl an Zielsetzungen ein größerer Fokus auf dem Darstellen und Auswerten von Messdaten.

Neben diesen normativen Zielsetzungen sind auch Kataloge durch Expertenbefragungen bzw. durch Diskussionen unter Experten entstanden. In der Studie von Welzel et al. (1998) wurden in sechs europäischen Ländern im Rahmen einer Delphi-Studie sowohl Lehrer:innen der Sekundarstufe II als auch Lehrende an Universitäten der Fächer Biologie, Physik und Chemie hinsichtlich ihrer Zielsetzungen in Bezug auf experimentelle Lernumgebungen befragt. Die Lehrenden der Universitäten wie auch die Lehrer:innen schätzten das Ziel *Verbindung von Theorie und Praxis* als am relevantesten ein. Anders als in der Schule wird dem Ziel *Erwerb experimenteller Fähigkeiten* an Universitäten eine größere Bedeutung als dem Ziel *Methoden wissenschaftlichen Denkens kennenlernen* zugeschrieben. Die Autoren interpretieren dieses Ergebnis so, dass Lehrende an der Universität eher einen Fokus auf berufsspezifische Fähigkeiten legen bzw. sie selbst Fachwissenschaftler:innen sind und dementsprechend wissen, was für Studierende im Fach Physik relevant ist (Welzel und Haller 1998). Die geringen Unterschiede zwischen Lehrer:innen und Lehrenden in den Ergebnissen der Studie deuten darauf hin, dass es nur wenige Unterschiede zwischen schulischem und universitärem Experimentieren auf Ebene der Zielsetzung sowie der Organisationsform gibt. Die Zielsetzungen können als konsensfähig angesehen werden, sind jedoch nicht sehr differenziert (u. a. Hucke 2000).

Im internationalen Bereich ist an der University of Colorado Boulder durch Diskussionen mit 66 Lehrenden ein sehr differenzierter Zielkatalog für experimentelles Arbeiten auf universitärem Niveau entstanden (Zwickl und Finkelstein 2013). Dieser umfasst vier Hauptkategorien mit zehn Subkategorien. In den Subkategorien werden 143 Zielsetzungen subsumiert. Neu an dem Katalog ist, dass die Zielsetzungen nicht auf einem abstrakten Niveau formuliert werden, sondern sehr detailliert konkrete Fähigkeiten benennen. Dieser Zielkatalog diente als Grundlage für die Überarbeitung der Laborpraktika in Boulder und wurde auch in Deutschland rezipiert.

Basierend auf diesem Zielkatalog haben Nagel et al. eine Umfrage für die Ent-

wicklung eines Zielkataloges für den deutschsprachigen Raum entwickelt (Nagel, Scholz und Weber 2018). Der Zielkatalog ist als Reaktion auf diverse Diskussionen der deutschen Praktikumsleiter:innen (AG Physikalische Praktika (AGPP)), die in Deutschland in einer Arbeitsgruppe der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG) organisiert sind und sich jährlich zweimal treffen, um über die Gestaltung von Laborpraktika zu diskutieren, entstanden. Die Umfrage wurde sowohl von den Praktikumsleiter:innen (n=53) als auch Studierenden (n=66) deutschsprachiger Universitäten bearbeitet. Die Proband:innen erhielten in dem Fragebogen eine Liste von Zielsetzungen (n=47), die sie hinsichtlich ihrer Bedeutsamkeit für die Lehr-Lernumgebung Laborpraktikum einschätzen sollten. Anhand der Ergebnisse konnten acht Kernziele für Laborpraktika abgeleitet werden, die sowohl von den Lehrenden als auch von den Studierenden als zentral wahrgenommen werden:

- "Grundlegende physikalische Ideen verstehen (Anm.: Die Physik „hinter“ den Experimenten)
- Grundlegende physikalische und technische Ideen verstehen (Anm.: Die Physik und Technik der Experimente und Messgeräte)
- Sorgfaltsdisziplinen wie Sorgfalt, Sauberkeit, Ordnung, Disziplin, Gewissenhaftigkeit, Hilfsbereitschaft, Ehrlichkeit, Pünktlichkeit, Zuverlässigkeit, Interesse und Selbstlernkompetenz
- Datenanalyse und Schlussfolgerungen
- Qualität der Messdaten abschätzen
- Laborbuch führen (im weitesten Sinne: schriftliches Dokumentieren des Experiments)
- Messdaten mit Vorhersagen vergleichen
- Statistische Methoden anwenden (Mittelwertbildung, nichtlineare Anpassung, χ^2-Test)" (Nagel, Scholz und Weber 2018, S. 103)

Überraschend an dieser Liste ist, dass die Praktikumsleiter:innen den *Sorgfaltsdisziplinen* trotz des impliziten Charakters (wird nicht angeleitet) einen so hohen Stellenwert zuweisen, dass diese es unter die acht Kernziele geschafft haben. Hier ist zu vermuten, dass dies eine tradierte Zielsetzung aus dem schulischen Bereich ist, wo vor allem ab den 1960er Jahren, als auch die kleinschrittigen Anleitungen für das Experimentieren deutliche Verbreitung erfuhren, Sorgfaltsdisziplinen im Kontext des erzieherischen Anspruchs von Schule einen hohen Stellenwert einnahmen. Die Sorgfaltsdisziplinen wirken hier wie eine Mischung aus erzieherischem Auftrag (Sorgfalt, Sauberkeit, Ordnung, Disziplin, Gewissenhaftigkeit, Zuverläs-

sigkeit, Pünktlichkeit, Hilfsbereitschaft, Ehrlichkeit) sowie einigen wünschenswerten Charaktereigenschaften bzw. Softskills (Interesse, Selbstlernkompetenz). Hier wird implizit aber vermutlich eher die Sicherstellung der Reproduzierbarkeit, was eines der vordergründigen Merkmale physikalischer Forschung darstellt, adressiert. Weiterhin sind Zielsetzungen, wie "Datenanalyse und Schlussfolgerungenöder "Laborbuch führen", aufgeführt worden, die kein Niveau auf dem diese Fähigkeiten angewendet werden sollen, enthalten. Die Zielsetzungen sind dementsprechend eher unvollständig formuliert und lassen viel Raum für Interpretationen. Die Zielsetzung SStatistische Methoden anwenden"hingegen ist mit einem Niveau (anwenden) formuliert. Jedoch kann hier festgehalten werden, dass es darum geht Mathematik als Werkzeug zu nutzen, was eigentlich auch der Zielsetzung "Datenanalyseïmmanent ist. Performative experimentelle Fähigkeiten, wie das Aufbauen von Experimenten, das Testen oder auch die kontrollierte Durchführung finden jedoch keinen Eingang in die Kernziele, obwohl diese bei Zwickl et al. und der KFP enthalten sind und bei den Treffen der AGPP Zustimmung gefunden haben. An dieser Stelle muss darauf hin gewiesen werden, dass Praktikumsleiter:innen vorrangig (promovierte) Fachphysiker:innen sind. Sie sind dementsprechend Expert:innen ihres Faches und können einschätzen, welche Fähigkeiten sie erlernt haben. Es handelt sich hier folglich um tradierte Zielsetzungen, die den Erfahrungen der Leiter:innen immanent sind.

Beim Vergleich der schulischen und universitären Zielsetzungen wird deutlich für Laborpraktika, anders als für den schulischen Physikunterricht, wo Aspekte von Nature of Science eine höhere Abstraktionsebene für die Reflexion beim handelnden Umgang mit der Physik bieten, keine expliziten Zielsetzungen in Bezug auf die Reflexion wissenschaftlicher Denk- und Arbeitsweisen für die Entwicklung angemessener Werthaltungen in Bezug auf Forschung aufgeführt werden. Hier scheint der schulische Ansatz der Vermittlung von Wissensressourcen und epistemologischen Überzeugungen zum Nachvollzug von Erkenntnisprozessen zu kurz zu greifen. Auf universitärer Ebene könnten die Aspekte des Kontruktes *Nature of Science* eher als funktionale Handlungsressourcen für den Forschungsprozess gesehen werden. Das würde bedeuten, dass auch die Grundprinzipien wissenschaftlicher Forschung zu den experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten auf universitärem Niveau dazu gehören. Neben einem grundsätzlichen Verständnis dazu, wie Erkenntnisprozesse innerhalb der Forschungscommunity entstehen, müssten Studierende z. B. im Sinne der "Regeln guter wissenschaftlicher Praxis" erlernen wie manipulationsfrei mit Messdaten umgegangen wird, welche Aspekte bei einer plausiblen und transparenten Darstellung des Experimentierens notwendig sind oder wie man Messergebnisse hinsichtlich ihrer Gültigkeit und Qualität einschätzt. Studierende erwerben diese funktionalen Wissens- und Handlungsressourcen bzw. auch Werthaltungen in der Physik typischerweise implizit während der Laborpraktika und im Rahmen der Erstellung der Qualifikationsarbeiten in den einzelnen Arbeitsgruppen der Professor:innen nach dem Ansatz learning by doing. Während der Qualifikationsarbeit bearbeiten die Studieren-

den ihr erstes eigenes Projekt und sind dabei meist eng in die Arbeitsgruppen integriert. Durch den Austausch mit den Mitgliedern der Arbeitsgruppen sowie durch den Besuch von Arbeitsgruppen-Meetings, in denen die Projekte diskutiert werden, wird ein grundlegendes Verständnis zur Funktionsweise von Forschungsprozessen erworben und im Rahmen der Qualifikationsarbeit angewendet.

Hier stellt sich jedoch nun die Frage, wie Laborpraktika als Bindeglied zwischen der schulischen Ausbildung und der forschenden Tätigkeit zu positionieren sind und welchen Anteil sie bei der Entwicklung experimenteller Fähigkeiten und Fertigkeiten in Bezug auf ein angemessenes Wissenschaftsverständnis aktuell besitzen bzw. besitzen sollten. Weiterhin ist aktuell aufgrund fehlender Modellierungen (Teichmann, Lewandowski und Alemani 2022) noch offen, welche Wissensressourcen bei der Entwicklung eines Verständnisses zum Forschungsprozess funktional sind.

Einen ersten Schritt für die Beantwortung dieser Fragen haben Teichmann et al. gemacht, indem sie einen Fragebogen (E-Class) zu Nature of Science Aspekten bezogen auf experimentbezogene wissenschaftliche Denk- und Arbeitsweisen aus den USA für deutsche Laborpraktika adaptiert haben (Teichmann, Lewandowski und Alemani 2022). Dieser ist bisher an der Universität Potsdam mit 111 Studierenden durchgeführt worden. Ein zentrales Ergebnis der Studie ist, dass

> "Students often know what are experts' views and attitudes in the laboratory, but do not personally practice those perspectives when working in laboratory courses. This possible contradiction might arise from a perception of students that laboratory courses are not authentic experimental physics experiences or the type of activities they engage in are not well aligned with authentic practice." (Teichmann, Lewandowski und Alemani 2022, S. 12)

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich die normativen und empirisch bestimmten Ziele bezüglich des Experimentierens für Schulen und Universitäten vom Wortlaut her kaum unterscheiden. Für beide Bildungsbereiche sind die Ziele so abstrakt formuliert, dass sie den Lehrenden ein hohes Maß an Freiheit bei der Interpretation und Umsetzung der Zielsetzungen gewähren. Mit Blick auf den jeweiligen Bildungsanspruch von Schule und Hochschule ist es verwunderlich, dass sich die Zielsetzungen vom Wortlaut her kaum unterscheiden. An Universitäten sollen die Studierenden zu Physiker:innen ausgebildet werden, d. h. sie sollen dazu befähigt sein, forschend tätig zu werden, was im Rahmen der Qualifizierungsarbeiten geprüft wird. Daraus abgeleitet müssten Laborpraktika als einziger Lehrveranstaltungstyp mit praktischen Anteilen die Studierenden gezielt darauf vorbereiten, d. h. sie müssen experimentelle Fähigkeiten und Fertigkeiten, funktionale Wissensressourcen im Bereich der physikalischen Denk- und Arbeitsweisen sowie relevante epistemologische Überzeugungen in Bezug auf den

Forschungsprozess erwerben. Die inhaltlichen Zielsetzungen von Laborpraktika sind mit Blick auf die forschende Tätigkeit wenig fachmethodisch orientiert, kaum differenziert und aufgrund eines fehlenden hochschuldidaktischen Diskurses nicht didaktisch fundiert. Vielmehr sind sie seit mehreren Jahrzehnten tradiert und werden aufgrund der Lehrfreiheit in Universitäten von den Leiter:innen sehr unterschiedlich ausgestaltet, sodass ein heterogenes Fähigkeitsspektrum bei den Studierenden in Bezug auf das Experimentieren zu erwarten ist. Eine didaktische Analyse (z. B. durch Performanztestung) bzw. auch Fundierung der unterschiedlichen Praktikumskonzeptionen (Kompetenzmodelle) gibt es bisher in Deutschland nicht[21], sodass dies ein Forschungsdesiderat darstellt (Nagel, Scholz und Weber 2018).

2.3.2. Didaktische Gestaltung und organisatorische Strukturen von Laborpraktika

Die didaktische Gestaltung sowie die organisatorischen Strukturen von Laborpraktika werden seit den 1920er Jahren quasi unverändert tradiert an deutschen Universitäten genutzt (Diemer, Baser und Jodl 1999, K. Neumann 2004, Welzel und Haller 1998, Schumacher 2007).[22] Aufgrund stark ansteigender Studierendenzahlen in den 1930er Jahren konnte die experimentelle Ausbildung nicht mehr formlos in den Experimentierkabinetten der Professoren stattfinden, sondern musste stark strukturiert und damit auch curricular verankert werden. [23]

Grundidee der Organisationsstruktur von Laborpraktika ist, dass die Studierenden in den Vorlesungen das physikalische Wissen erlernen und dieses dann an durch engmaschige Anleitungen stark vorstrukturierten Experimenten anwenden (Westphal 1938, K. Neumann 2004). Diese organisatorische Struktur erlaubt es, viele Studierende mit einer übersichtlichen Anzahl an Lehrenden gleichzeitig experimentieren zu lassen.

Seit dem Bologna-Prozess besteht aufgrund der neuen Lehr-Lernorientierung (Weg von Lernzielen hin zu Learning-Outcomes) ein erhöhter Bedarf an Neukonzeptionen der Lehr-Lernumgebung Laborpraktika, um den neuen bildungspolitischen Anforderungen gerecht zu werden. Unterstützt wird dieser Prozess ebenfalls

[21] Mit PraQ ist ein erstes Instrument zum Vergleich unterschiedlicher Praktikumskonzeptionierungen auf Ebene der Zufriedenheit der Studierenden nach dem Ansatz einer Veranstaltungskritik entwickelt worden (Rehfeldt 2017).

[22] Teile der Argumentationsstruktur sowie der Inhalte dieses Kapitels sind in folgenden Arbeiten schon publiziert worden: Bauer und Sacher Marc D. 2018, Sacher und Bauer 2021, Bauer, Sacher u. a. 2021, Bauer, Lahme und Sacher 2022

[23] Die Geschichte des Experimentierens an Universitäten ist mittlerweile umfangreich erschlossen und kann ausgehend von folgenden Autoren nachgelesen werden: Lunetta, Hofstein und Clough 2007, Cahan 1992, Hund 1987, Lind 1996, Manthei 1995, K. Neumann 2004

durch die kontroversen Diskussionen bezüglich der Lernwirksamkeit von Experimentierumgebungen, die sowohl für die Schulen als auch für die Universitäten geführt werden. Im Folgenden wird analysiert, (a) welche Studierenden, auf welche Art und Weise Laborpraktika absolvieren, (b) welche klassischen didaktischen bzw. organisatorischen Strukturen von Laborpraktika angelegt werden, sowie (c), welche neuen Ansätze bei der Umgestaltung von Laborpraktika vorliegen.

Laborpraktika sind fester Bestandteil der Curricula von MINT-Studiengängen sowie anderer Studiengänge, z. B. der Medizin. Im Rahmen von Physikstudiengängen absolvieren die Studierenden typischerweise im Bachelor-Studiengang ein Anfänger- und ein Fortgeschrittenen-Laborpraktikum. Die Anzahl der Semester sowie die damit verbundenen ECTS-Punkte variieren je nach Studiengang und Studienstandort stark. Anfänger-Laborpraktika sind in der Regel zwischen dem ersten und vierten Semester curricular verankert und umfassen abhängig vom Studienstandort zwischen zwei und vier Semester. Laborpraktika werden typischerweise auch von Lehramtsstudierenden mit Schwerpunkt auf Gymnasien und Gesamtschulen im Rahmen ihrer fachwissenschaftlichen Ausbildung belegt. In Physik Masterstudiengängen sind meist Projektpraktika als Vorbereitung auf die Masterarbeiten integriert. Diese werden oftmals von den einzelnen Lehrstühlen realisiert und umfassen komplexere Experimente, die nahe am jeweiligen Forschungsschwerpunkt des Lehrstuhls orientiert sind. Studierende anderer Studiengänge belegen meist ein für ihren Studiengang speziell angebotenes Laborpraktikum, das als Exportveranstaltung durch die Physik gestaltet wird.[24]

Strukturell gesehen absolvieren die Studierenden im Rahmen eines Laborpraktikums (während eines Semesters) mehrere unterschiedliche Experimente an mehreren Experimentiertagen. Die physikalischen Inhalte sind meist fachsystematisch strukturiert und auf die parallel stattfindende Experimentalphysik-Vorlesung abgestimmt. An einigen Universitätsstandorten sind die Laborpraktika ein Semester nachgelagert. Typischerweise wird pro Semester ein Themengebiet (z. B. Mechanik, Atomphysik) fokussiert. Ein Experimentiertag gliedert sich grob in eine Vorbereitung des Experimentes, die Durchführung und Auswertung. Die konkrete Ausgestaltung der einzelnen Phasen variiert je nach Laborpraktikum und den intendierten Learning-Outcomes.

Die Vorbereitung eines Experimentes wird von den Studierenden meist im Selbststudium zu Hause absolviert. Sie erhalten dazu eine engmaschige Anleitung in der die physikalischen Grundlagen, der Aufbau, die experimentelle Fragestellung/Aufgabe sowie die Schritte für die Durchführung und Auswertungen dargestellt sind. Zu Beginn des Experimentiertages findet typischerweise ein Prüfungsgespräch zu den vorbereiteten Inhalten mit den Lehrenden statt. In dem

[24] Im Folgenden werden aufgrund der Zielsetzung des Projektes lediglich die Anfänger-Laborpraktika näher betrachtet. Fortgeschrittenen-, Nebenfach- oder Projektpraktika des Masterstudienganges werden nicht analysiert.

Gespräch wird überprüft, ob die Studierenden inhaltlich ausreichend vorbereitet sind und die Sicherheitsaspekte des Experimentes durchdacht haben. Hiermit wird sichergestellt, dass die Studierenden wissen, was sie tun müssen und sich dabei nicht verletzen bzw. teures Equipment beschädigen. Im Anschluss führen die Studierenden das Experiment nach den Schritten der Anleitung durch und protokollieren die Erkenntnisse. Die Lehrenden begleiten sie dabei, indem Fragen beantwortet werden bzw. darauf geachtet wird, dass die Laborsicherheit eingehalten wird. Im Anschluss an das Experiment verfassen die Studierenden eine Abhandlung zu dem Experiment. Diese variiert vom Umfang und Inhalt her je nach Studiengang und Studienstandort stark zwischen einem handschriftlichen umfangreicheren Protokoll bis zu einem ausführlichen Laborbericht, der strukturell wissenschaftlichen Veröffentlichungen im Fach Physik (IMRaD-Struktur (Riewerts 2016, Sollaci und Pereira 2004)) entspricht. Je nach Modulbeschreibung wird die Endnote für das Modul auf Basis der Eingangsprüfung und/oder der Durchführung und/oder der Protokolle bzw. der Laborberichte bestimmt. An einigen Studienstandorten sind Laborpraktika auch unbenotet und in einem Modul zusammen mit z. B. der Vorlesung zur Experimentalphysik integriert. Weiterhin gibt es Standorte, an denen die Studierenden am Ende des Laborpraktikums eine praktische Prüfung im Sinne eines *Performance Assessments* absolvieren müssen und dafür die Note für das Modul erhalten.

Die Lehrveranstaltung Laborpraktikum wird abhängig vom Studiengang, der Hochschulform sowie der Studierendenzahlen von Hochschullehrer:innen, Postdocs, Doktorand:innen, studentischen Hilfskräften und/oder Techniker:innen mit einer Betreuungsrelation zwischen 1:2 und 1:20 realisiert. An einigen Standorten gibt es spezielle Schulungen, die die Lehrenden auf ihre Aufgaben vorbereiten.

Die standardisierten Experimente sind oftmals hypothetisch-deduktiv angelegt und werden von Lehrmittelfirmen bereitgestellt, oder die Experimente werden an den Standorten entwickelt und standardisiert. Sie sind dementsprechend vollständig aufgebaut und mit einer Anleitung für die Bedienung versehen. Die Freiheitsgrade bei der Durchführung sind dementsprechend oft eher eingeschränkt. Der Fokus der Experimente liegt demnach bei der Reproduktion möglichst exakter Werte mit Hilfe eines relativ störungsunanfälligen experimentellen Setups. Das experimentelle Vorgehen in klassischen Laborpraktika kann demnach dem *context of justification* zugeordnet werden.

Die Bewertung der studentischen Leistungen gestaltet sich aufgrund der undifferenzierten Zielsetzungen bzw. der fehlenden fachdidaktischen Fundierung schwierig. Mittlerweile sind diverse Bewertungsbögen entstanden, die sich jedoch erheblich in ihrer Strukturierung und auch Graduierung unterscheiden. An diversen Universitäten ist weiterhin nur grob festgelegt, was in den einzelnen Experimenten bewertet wird. Hier haben folglich die Lehrenden einen sehr großen Entscheidungsspielraum. Die Lehrenden haben im Rahmen ihres Studiums selbst

solche Laborpraktika durchlaufen, d. h. sie haben eigene Vorstellungen dazu, was ihnen geholfen hat, wie man die Schwerpunkte setzen sollte und welche Aspekte die Qualität der studentischen Leistungen ausmachen. Es kann insgesamt also nicht davon ausgegangen werden, dass Studierende über alle Experimente und Lehrenden hinweg ein vergleichbares, passgenaues formatives Feedback erhalten, das ihren Lernprozess unterstützt.

Die Mehrheit der Neu- und Weiterentwicklungen der Lehr-Lernumgebung Laborpraktikum wurde von der Diskussion zur Lernwirksamkeit von Experimenten sowie vom Bologna-Prozess und den damit verbundenen Herausforderungen ausgelöst. Weiterhin stellte die fortschreitende Digitalisierung einen Katalysator für die Entwicklung und Implementation von neuen Materialien und Experimentiersettings dar.

Bis zu den 2000er Jahren wurde in Deutschland vor allem der Kanon der Experimente regelmäßig aktualisiert, wohingegen die didaktische bzw. die organisatorische Struktur unberührt blieb. Die Weiterentwicklungen von Laborpraktika[25] können hinsichtlich ihres adressierten Fokus zur Steigerung der Lernwirksamkeit unterschieden werden: Bei einigen wenigen Konzepten wird die vollständige didaktische Struktur der Lehr-Lernumgebung neu gestaltet. Bei einigen Praktikumskonzeptionierungen wurden einzelne Aspekte u. a. unter der Nutzung von eLearning-Anteilen hinsichtlich der Lernwirksamkeit optimiert.

An der Technischen Universität Berlin ist schon ab Ende der 1960er Jahre (Merli, Kanngießer und Möller 2020) auf Drängen der Studierenden ein Projektpraktikum für die Studierenden in den ersten drei Semestern des Physikstudiums nach dem Ansatz des forschenden Lernens (Huber 1998) entwickelt worden (Merli, Kanngießer und Möller 2020). Damit gehören sie zu den Ersten, die eine umfangreiche Neustrukturierung von Laborpraktika in Deutschland realisiert haben. Auch Micol Alemani nutzt den Ansatz des forschenden Lernens für die Überarbeitung des Anfängerpraktikums der Universität Potsdam (Alemani 2017, Knoke 2021). Ihr Ziel ist, die Studierenden "für die Wissenschaft und das unerschrockene Experimentieren [zu] begeistern" (Knoke 2021). Eine systematische Überprüfung der Lernwirksamkeit dieses Ansatzes stellt aktuell noch ein Desiderat dar (Merli, Kanngießer und Möller 2020).

Theyßen entwickelte auf Basis der didaktischen Rekonstruktion (Kattmann u. a. 1997) unter Nutzung des konsequent-konstruktivistischen Lehr-Lernverständnisses (S. v. Aufschnaiter und Welzel 1997) ein adressatenspezifisches Laborpraktikum

[25] An dieser Stelle muss angemerkt werden, dass es eine Vielzahl an Überarbeitungen an den einzelnen Universitätsstandorten in den vergangenen 20 Jahren gegeben hat. Aufgrund dessen, dass Praktikumsleiter:innen typischerweise Fachwissenschaftler:innen sind, veröffentlichen sie ihre didaktischen Neuerungen nicht bzw. nur selten in einschlägigen Journalen. Im Folgenden kann deswegen (leider!) nur auf solche Neuentwicklungen eingegangen werden, die veröffentlicht wurden.

für Mediziner:innen (Theyßen 1999). Ziel ist die Erhöhung der Relevanzwahrnehmung durch sinnstiftende, didaktisch auf das Vorwissen der Lernenden bezogene aufbereitete Kontexte, um damit verbunden die Motivation und Lernwirksamkeit zu erhöhen. Dieser Ansatz ist mittlerweile an diverse andere Universitäten (z. B. Portland State University, USA) sowie auf andere Adressaten (Ernährungswissenschaften (Nagel und Wolny 2013); Chemie und Geowissenschaften (Fricke 2018), Lehramtsstudierende Physik (Andersen 2020)) transferiert worden.

Ausgelöst von der Umfrage zu den Zielsetzungen experimentellen Arbeitens von Welzel et al. (1998) sowie der Vorarbeit von Theyßen (1999) wurde nach dem gleichen Ansatz an der Universität Düsseldorf basierend auf dem Ansatz der didaktischen Rekonstruktion ein Laborpraktika für Physiker:innen entwickelt, implementiert und evaluiert (K. Neumann 2004). Grundidee ist, dass die Studierenden schrittweise und systematisch an die Aspekte des experimentellen Arbeitens herangeführt werden. Im ersten Teil erlernen die Studierenden die Funktionalität sowie die Bedienung von (Mess-)Geräten und im zweiten Teil erlernen sie die grundlegenden Methoden wissenschaftlichen Arbeitens. Ihre erworbenen Fähigkeiten erproben sie im dritten Teil im Rahmen eines selbstständigen Projektes. Dieser Ansatz hat die typische inhaltliche Struktur von Laborpraktika aufgebrochen und basierend auf didaktischen Evidenzen zur Lernwirksamkeit neu gestaltet. Die Materialien, die die Studierenden für das Absolvieren erhalten, sind weiterhin engmaschig gestaltet und um Lückentexte ergänzt worden.

An der Universität Paderborn entwickelte Sacher (2015) ein kompetenzorientiertes Laborpraktikum mit dem Ziel, die für die Forschung in der Physik benötigten methodischen Fähigkeiten und Fertigkeiten anzubahnen (Sacher, Probst u. a. 2015). Die grundsätzliche Gliederung folgt hier fachmethodischen Aspekten und nicht der gängigen fachsystematischen Gliederung. Fokus des Projektes ist der systematisch und stufenweise über vier Semester angelegte Erwerb experimenteller Kompetenzen nach dem Ansatz des Cognitive Apprenticeship (Collins, Brown und Holum 1991). Im Verlauf der ersten drei Semester nehmen die inhaltlichen und kognitiven Anforderungen schrittweise zu und die Lernbegleitung realisiert durch die Lehrenden sowie eine systematische Scaffolding-Struktur wird ausgeschlichen. Ziel ist, dass die Studierenden nach Beendigung des Grundpraktikums auf einem angemessenen Niveau die Fähigkeiten, die für den physikalischen Forschungsprozess relevant sind, handlungsfähig erlernt haben. Im vierten Semester wenden die Studierenden ihre erlernten methodischen Fähigkeiten und Fertigkeiten im Rahmen eines eigenen Projektes von der Entwicklung der Fragestellung und des experimentellen Settings, über die Durchführung und Auswertung sowie die Präsentation des Projektes in Wort und Schrift an. Dafür wurden die klassischen Lernziele, Experimentieranleitungen, die experimentellen Settings, die experimentellen Fragestellungen, die Begleitmaterialien, die Ablaufstruktur an den Experimentiertagen, die Betreuung durch die Lehrenden sowie die Formen der Zusammenarbeit unter den Studierenden in dem Konzept neu angelegt und

im Verlauf mehrerer Erprobungen passgenau weiterentwickelt.

Neben einer grundlegenden Überarbeitung von Praktikumskonzeptionierungen finden sich auch Vorschläge, die einzelne Aspekte der Lehr-Lernumgebung optimieren. So werden ausgelöst von der fortschreitenden Digitalisierung neben klassischen Präsenzformaten auch immer mehr eLearning-Aspekte für das Lehr-Lernformat Laborpraktikum entwickelt. Das Ausmaß des Einsatzes variiert dabei zwischen dem Einsatz von eLearning in einzelnen Phasen bis hin zum vollständigen virtuellen Experimentieren. Grundsätzlich verspricht man sich durch die Integration von eLearning-Angeboten eine Erhöhung der Lernwirksamkeit durch eine auf heterogene Lernvoraussetzungen abgestimmte Lernumgebung und durch die Einbindung zusätzlicher Repräsentationen eine Unterstützung bei der Modellbildung sowie eine Reduktion der kognitiven Belastung (cognitive load) (Chandler und Sweller 1991). Dies wird neben der Einbindung unterschiedlicher Repräsentationsformen der Inhalte auch durch die Ermöglichung selbstgesteuerten Lernens bzw. durch die Tatsache, dass die Studierenden sich ohne Zeit- und Leistungsdruck mit den Inhalten auseinandersetzen können, realisiert. Im Folgenden werden beispielhaft einige solcher Projekte beschrieben.

Ein Beispiel für die vollständige Digitalisierung von Laborpraktika stellen Remote-Control-Experimente dar. So wurden experimentelle Aufbauten realisiert, die von den Studierenden vollständig in Abhängigkeit der individuellen Lernvoraussetzungen über das Internet bedient werden können (Jahnke u. a. 2010). Ein weiteres Beispiel stellt die virtuelle Lehr-Lernumgebung von Theyßen et al. dar: Sie haben für das Konzept des adressatenspezifischen Praktikums für Nebenfächer eine virtuelle Lernumgebung entwickelt. In dieser sind die Fachwissenselemente, Simulationen sowie diverse interaktive Bildschirmexperimente (IBE) enthalten, die die Studierenden selbstständig unter Berücksichtigung ihrer individuellen Voraussetzungen bearbeiten können (Theyßen, Struzyna u. a. 2016).

Zur Unterstützung der Studierenden bei herausfordernden Aspekten des Laborpraktikums werden Erklärvideos eingesetzt. Sie stellen ein typisches Beispiel für eLearning in der Vorbereitungsphase der Praktikumsversuche dar. Sie können von den Studierenden individuell bei der Erarbeitung des Fachwissens oder zum Verständnis der Auswertungsmethodik genutzt werden (Burdinski 2018, Nagel und Oppermann 2018a). Interaktive Hypermedia-Skripte, Simulationen und interaktive Bildschirmexperimente ermöglichen es, dass die Studierenden sich im Vorfeld des Praktikumsversuchs tiefer gehend und mit Hilfe unterschiedlicher Repräsentationsformen mit komplexen Phänomenen auseinandersetzen können (Fricke 2018, Fraß, Weyers und Heinke 2014, Kreiten, Bresges und Schadschneider 2010, Teichrew und Erb 2018, F. Sander 2000, Hucke 2000, Diemer, Baser und Jodl 1999). Einen weiteren Ansatz stellen *Augmented-Reality* sowie *Virtuelle Labore* dar. Diese sind als multimediale, virtuelle Realität konzipiert und ermöglichen es, sich im Vorfeld mit den Handlungsabläufen, die für den Praktikumsversuch notwen-

dig sind, vertraut zu machen (Schlattmann 2004 Akçayır u. a. 2016, Altmeyer u. a. 2020). Auch Webanwendungen in Form von Applications sind enstanden: Holz und Heinicke haben eine App entwickelt, die die Studierenden beim Bestimmen der Messunsicherheiten unterstützt (Universität Münster, Prof. Dr. Stefan Heusler 2021). Stampfer et al. haben die App *Phyphox* entwickelt, die es ermöglicht das Handy als Experimentierunterstützung zu nutzen (Stampfer, Heinke und Staacks 2020). Die Universität Bielefeld unterstützt die Studierenden beim Erlernen des Schreibens in der Physik mit dem Online-Wiki *LabWrite* (Riewerts 2016).

Neben den eLearning-Unterstützungsansätzen sind auch eine Reihe von Offline-Angeboten entstanden. An der RWTH Aachen werden beispielsweise die Studierenden zum einen bei der Auswertung von Messdaten mittels gestufter Unterstützungsmaßnahmen (Joußen, Thiel und Heinke 2019) sowie zum anderen nach dem Ansatz des Peer-Feedbacks beim Erstellen von Laborberichten (Lammertz und Heinke 2016) unterstützt.

Im anglo-amerikanischen Raum sind zur Erhöhung der Lernwirksamkeit unterschiedliche Laborpraktika im MINT-Bereich hinsichtlich ihrer Zielsetzungen (research-based, scientific abilities, critical physics thinking, model-based reasoning) und Aufgabenstellungen (open-ended, scaffolded) überarbeitet und evaluiert worden (Brownell u. a. 2012, Etkina, van Heuvelen u. a. 2006, Etkina, Karelina u. a. 2010, Holmes und Wieman 2018, Holmes, Wieman und Bonn 2015 Zwickl, Hu u. a. 2015 Dounas-Frazer und Lewandowski 2018).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die grundsätzliche didaktische bzw. organisatorische Struktur von Laborpraktika seit den 1930er Jahren in Deutschland bis auf wenige Ausnahmen kaum verändert wurde. Laborpraktika folgen meist keiner fachmethodischen, sondern der tradierten inhaltlichen Orientierung, wobei deutschlandweit aufgrund fehlender inhaltlicher Zielsetzungen und der Freiheit der Lehre nicht von einem einheitlichen Curriculum gesprochen werden kann. Im Rahmen der Mehrheit der deutschen Laborpraktika werden Experimente mit engmaschigen Anleitungen durchgeführt, die dem *context of justification* zuzuordnen sind. Laborpraktika werden von Fachwissenschaftler:innen geleitet, die aufgrund des fehlenden hochschulfachdidaktischen Diskurses bei der Gestaltung und Weiterentwicklung nicht auf fachdidaktisch fundierte und damit auch passgenau auf die Bildungsansprüche universitärer Lernziele entwickelte Konzepte zurückgreifen können. Der Fokus der experimentellen Arbeit in Laborpraktika liegt folglich weiterhin eher auf der Ebene der Zielsetzung *Verbindung von Theorie und Praxis* und damit im Bereich des Vertiefens von Fachwissen und weniger auf dem Erlernen der Fachmethodik. Fachmethodische Fähigkeiten und Fertigkeiten werden implizit über die Durchführung diverser Experimente zu unterschiedlichen Fachinhalten vermittelt. Es sind jedoch als Reaktion auf unterschiedliche Forschungsprojekte, die im Rahmen der Lernwirksamkeitsdebatte von experimentellen Lernumgebungen durchgeführt worden sind, bzw. als Reaktion auf

den Bologna-Prozess sowie auf die fortschreitende Digitalisierung diverse Unterstützungsangebote, die Teilaspekte des Laborpraktikums adressieren, entstanden. Diese konnten bisher jedoch noch nicht systematisch und vergleichend zu anderen Konzepten evaluiert werden.

2.3.3. Lernwirksamkeit von Laborpraktika

Für die Modellierung der experimentellen Kompetenz Physikstudierender ist es aufgrund fehlender didaktischer Modelle und Instrumente weiterhin essentiell zu analysieren, welche experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten an Universitäten in welcher Qualität ausgebildet werden sollen. Nach Analyse der Zielsetzungen sowie der didaktischen bzw. der organisatorischen Struktur wird nun das Lehr-Lernformat Laborpraktika vor dem Hintergrund des Diskurses zur Lernwirksamkeit von Experimentieren in der Universität in Abgrenzung zum Experimentieren in der Schule und in der Forschung analysiert. Dazu werden Evidenzen zur Lernwirksamkeit auf nationaler und auf internationaler Ebene analysiert.

In Kapitel 2.3.1 ist deutlich geworden, dass sich die Zielsetzungen, die mit dem Experimentieren an Schulen und Universitäten verbunden sind, vom Wortlaut her kaum unterscheiden. Gemeinsam haben Schule und Universität, dass die Lernenden beim Experimentieren oftmals engmaschig angeleitet werden und unterstützt durch Lehrende durchführen. Auch die experimentellen Aufgabenstellungen sind sehr ähnlich angelegt und haben zum Ziel, dass die Studierenden möglichst exakte Werte aufnehmen und mit Literaturwerten vergleichen können.

Anders ist an Universitäten, dass die Studierenden für die Vorbereitung im Selbststudium einen höheren Grad an Selbstständigkeit aufweisen müssen. Dies stellt vor allem zu Beginn des Studiums einige Studierende vor große Herausforderungen, da ihnen der Umfang der Vorbereitung und die mit den Experimenten verbundenen Anforderungen oftmals nicht klar ist. Diese Herausforderung nimmt jedoch mit fortschreitender Anzahl an absolvierten Experimenten deutlich ab. Hier wirkt auch die Tatsache, dass die Experimente von Lehrmittelfirmen stammen und teilweise seit Jahrzehnten eingesetzt werden, für die Studierenden unterstützend. Sie können sich die Protokolle und Materialien anderer Studierender besorgen, die zu eigentlich allen Standard-Experimenten auch im Internet verfügbar sind, und können diese für die Vorbereitung sowie für das Schreiben der Laborberichte verwenden.

Einen weiteren Unterschied stellt der an Universitäten höhere Augenmerk auf die statistische Analyse der Messdaten dar. In Schulen wird ein hoher Anteil der Experimente eher mit dem Ziel, qualitative Messdaten (*Visualisierung von Phänomenen*) zu generieren, durchgeführt. Damit die Studierenden diese Fähigkeiten erwerben,

erhalten sie meist eine mehrwöchige Einführung in das Laborpraktikum, bei der ihnen vor allem die statistischen Analysemethoden sowie die Verfahren zur Bestimmung von Messunsicherheiten, also mathematische Werkzeuge, vermittelt werden. Weiter sind an Universitäten durchgeführte Experimente sowohl hinsichtlich des erforderlichen Fachwissens als auch hinsichtlich der Bedienung und Auswertung komplexer als die in der Schule. Die inhaltliche und methodische Komplexität steigert sich allerdings nicht im Verlauf des Anfängerpraktikums, da die Experimente je Semester auf Basis der Fachsystematik der Grundvorlesungen (Mechanik, Elektrodynamik, Optik, Atomphysik) ausgewählt werden.

Es stellt sich nun die Frage, wie sich die Gemeinsamkeiten aber auch die Unterschiede zwischen dem schulischen und universitären Experimentieren auf die Lernwirksamkeit auswirken. Aufgrund der gleichen didaktischen Struktur, d. h. der Nutzung von engmaschig angeleiteten experimentellen Aufgabenstellungen, die die zu absolvierenden Schritte vorgeben, verwundert es nicht, dass der Diskurs zur Diskrepanz zwischen den Zielen und den erworbenen Fähigkeiten und Fertigkeiten beim Experimentieren für die Schule und die Universität gemeinsam geführt werden kann. Bei diesen engmaschigen experimentellen Aufgabenstellungen entfällt in der Regel das eigenständige Planen und Aufbauen der Experimente und damit verbunden das Durchdenken des experimentellen Vorgehens, was häufig zu rein ergebnisorientierten Handlungen führt (Wilcox und Lewandowski 2016, Hucke 2000): Werden die erwarteten Ergebnisse reproduziert, wird das Experiment beendet. Eine intensive methodische Analyse des experimentellen Vorgehens findet nicht statt (Hucke 2000). Dies verhindert letztendlich eine tiefer gehende Beurteilung der Methoden und Messergebnisse (Holmes, Wieman und Bonn 2015, Haller 1999, Hucke 2000) und führt zu teilweise erheblichen Defiziten im Bereich der experimentellen Kompetenz (Haller 1999). Elementare experimentelle methodische Fähigkeiten, die für das Experimentieren in der Forschung und damit auch für das erfolgreiche Absolvieren der Qualifikationsarbeiten benötigt werden, werden nicht systematisch erworben.

Aspekte, wie die Festlegung eines für die experimentelle Fragestellung sinnvollen Messplanes, die Auswahl und damit verbunden die Analyse von (Mess-)Geräten hinsichtlich ihrer Eignung und Funktionsweise oder das Testen von Einzelkomponenten oder des Gesamtsystems, können mit den Lehrmittelexperimenten und den engmaschigen Anleitungen nicht vermittelt werden (Hucke 2000, F. Sander 2000). Damit geht auch die Möglichkeit verloren, den Studierenden einen Einblick in die Grundprinzipien der Forschungsmethodik, wie z. B. den Experimentierprozess als einen iterativen Gesamtprozess mit vielseitigen Wechselwirkungen zu sehen und damit verbunden z. B. bereit zu sein, vorangegangene Schritte zu optimieren.

Vor dem Hintergrund der von Welzel et al. (1998) und Nagel et al. (2018) empirisch erhobenen Zielsetzungen verwundert dieses Ergebnis nicht. Nach Welzel

et al. hat das Ziel *Verbindung von Theorie und Praxis* die höchste Bedeutung für die universitäre Ausbildung. Nach Nagel et al. dominieren diese Ziele neben der Vermittlung mathematischer Werkzeuge ebenfalls die Kernziele. Sander (2000), der eine umfangreiche Analyse der Struktur physikalischer Praktika hinsichtlich der Verbindung von Theorie und Experiment durchgeführt hat, beobachtet, dass reflexive Aussagen von Studierenden nur nach Aufforderung der Lehrenden oder durch explizite Nennung innerhalb der Aufgabenstellung und dann auch nur auf einem sehr niedrigen methodisch-inhaltlichen Niveau getätigt werden. Dies hat zur Folge, dass vorhandene Handlungsspielräume und Möglichkeiten zur Reflexion oder Exploration durch die Studierenden nicht genutzt werden. Sanders Ergebnisse deuten darauf hin, dass das Ziel der methodischen Ausbildung nicht erreicht wird und Studierende auch nach dem Absolvieren des Anfängerpraktikums nicht in der Lage sind, Experimente inhaltlich und methodisch zu reflektieren. Weiterhin konnte Sander keinen Effekt des Anfängerpraktikums auf die Förderung des theoretischen Verständnisses der Studierenden finden, was darauf hindeutet, das Studierende das Fachwissen, das in Vorlesungen ohne authentischen Problemkontext vermittelt wird, nicht zur physikalischen Problembewältigung nutzen können (Höttecke, Henke und Rieß 2012).

Die Ergebnisse von Studien zur Lernwirksamkeit von Laborpraktika aus dem internationalen Raum decken sich mit den Evidenzen aus Deutschland. Toothacker kritisierte in seinem Review schon 1983, dass Laborpraktika in ihrer organisatorischen und didaktischen Struktur kaum lernwirksam sind (Toothacker 1983). Er führt an, dass Laborpraktika nicht so effektiv sind, dass sie den Personalaufwand bzw. die Kosten rechtfertigen würden und fordert eine Reform der Laborpraktika hinsichtlich der Aufgabenstellungen und uneinheitlichen Zielsetzungen. Lernende würden aufgrund fehlender systematischer Ausbildung in experimentellen Lernumgebungen kaum experimentelle Fähigkeiten und Fertigkeiten erwerben. Weiterhin kritisiert er, dass kaum Studien zur Lernwirksamkeit gemacht wurden und dass die Studien, die existieren, zu kleine Stichproben untersuchen. 30 Jahre später führen Wieman und Holmes (2015) immer noch an, dass auch im anglo-amerikanischen Raum kaum Studien zur Wirksamkeit von Laborpraktika durchgeführt werden und dass die existierenden Studien schon relativ alt sind (Wieman und Holmes 2015). Weiterhin führen sie an, dass auch für das US-amerikanische College-System sehr viele unterschiedliche Lernziele definiert wurden, diese aber kaum so differenziert beschrieben sind, dass ein Vergleich von Studien zur Lernwirksamkeit möglich ist (Wieman und Holmes 2015). Aktuell habe die American Assiciation of Physics Teachers (AATP) 2014 den vorherigen Katalog von 1998 mit den Zielsetzungen für Laborpraktika so überarbeitet, so dass sie "much more skills-focused" (Wieman und Holmes 2015, S. 977) sind. Sie sind in folgende Themen gegliedert: "Analyzing and visualizing data, communicating physics, constructing knowledge, designing experiments, developing technical and practical skills; and modeling" (American Association of Physics Teachers 2014, S.29).

Aufgrund fehlender valider Messinstrumente können bisher keine evidenzbasierten Aussagen zur Lernwirksamkeit physikalischer Laborpraktika getätigt werden. Es ist jedoch aufgrund der Gestaltung der experimentellen Aufgabenstellungen, die auch so im schulischen Bereich verwendet werden, zu vermuten, dass die Lernwirksamkeit eher niedrig ist. Auch hier liegt, wie im schulischen Bereich, eine deutliche Diskrepanz zwischen den intendierten Lernzielen und den Fähigkeiten und Fertigkeiten der Studierenden vor. Es lässt sich jedoch festhalten, dass die Herausforderungen in Bezug auf eine Lernwirksamkeitssteigerung des experimentellen Arbeitens an der Universität anders als in der Schule gelagert sind. Während an Schulen die Lernziele von der KMK systematisch vorgegeben, jedoch u. a. aufgrund der limitierenden Rahmenbedingungen nicht erreicht werden, existieren an Universitäten aufgrund der Lehrfreiheit der Dozierenden, abgesehen von Empfehlungen der KFP, keine einheitlichen und differenzierten Zielsetzungen, an denen sich Praktikumsleiter:innen für eine lernwirksame Gestaltung der Lehr-Lernveranstaltung orientieren können. Der Bologna-Prozess hat zwar dafür gesorgt, dass in den universitären Modulbeschreibungen experimentelle Kompetenzen mit performativem Fokus als Ziel aufgenommen wurden, jedoch hat dies, wie u. a. auch die Expertenbefragung der Praktikumsleiter:innen (Nagel, Scholz und Weber 2018) zeigt, nur auf dem Papier und nicht in den Konzeptionierungen eine Änderung bewirkt. Eine umfassende Neugestaltung der Lehr-Lernumgebung bzw. ein Umdenken bei den zu erreichenden Zielen hin zu einer Methodik-Orientierung, die für die Veranstaltung aufgrund der rein praktischen Anteile mit Blick auf die spätere berufliche Tätigkeit angezeigt wäre, hat (noch) nicht flächendeckend stattgefunden. Vielmehr legen die Praktikumsleiter:innen die Zielsetzungen für ihre Laborpraktika fest, und lassen hier aufgrund ihrer oftmals rein fachwissenschaftlichen Ausbildung, in der die Fachmethodik meist implizit durch learning-by-doing erlernt wurde, vorrangig die tradierten Zielsetzungen einfließen bzw. erwarten eher technisch-mathematische Fähigkeiten.[26]

2.3.4. Fazit

Studierende sollen im Rahmen ihres Studiums auf eine berufliche Tätigkeit als Physiker:in vorbereitet werden. Laborpraktika stellen im physikalischen Studium die einzige fachpraktische Lehrveranstaltungsart dar. Sie sind folglich prädestiniert für die Vermittlung von fachmethodischen Fähigkeiten und Fertigkeiten

[26] Eine Unterstützung durch die Fachdidaktiken Physik gestaltet sich an dieser Stelle herausfordernd, da der Fokus der Fachdidaktiken bzw. auch der Drittmittelgeber auf dem schulischen Ausbildungszweig liegt. Mittlerweile können Drittmittelgelder für die Erforschung und Weiterentwicklung universitärer Lehre eingeworben werden (Stifterverband, Stiftungen für Innovationen in der Hochschule), um die Praktikumsleiter:innen, die oftmals aufgrund des hohen organisatorischen Aufwandes oder des Umfanges der eigenen Stelle kaum zeitliche Ressourcen haben, auch personell zu unterstützen.

und eines passenden Forschungsverständnisses in Bezug auf das Experimentieren. Ihre Zielsetzungen, ihre didaktische und ihre organisatorische Struktur weichen jedoch von diesen Ansprüchen ab und werden seit Jahren tradiert. Die experimentellen Aufgabenstellungen sind engmaschig angelegt und zumeist dem *context of justification* zuzuordnen.

Aufgrund eines fehlenden hochschuldidaktischen Diskurses zum Experimentieren auf universitärem Niveau (Studium und Forschung) ist aktuell noch unklar, welche experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten sowie Vorstellungen zum Forschungsprozess Physikstudierende im Rahmen von Anfängerlaborpraktika als Vorbereitung auf den Forschungsalltag erwerben bzw. erwerben sollten. Weiterhin fehlt es an Kompetenzmodellen zur experimentellen Kompetenz auf universitärem Niveau, die Praktikumsleiter:innen dabei unterstützen würden ihre Lehrveranstaltungen expliziter auf einen systematischen Erwerb experimenteller Fähigkeiten und Fertigkeiten auszurichten und somit deren Lernwirksamkeit zu erhöhen. Auf Basis eines Kompetenzmodells könnten weiterhin valide Messinstrumente entwickelt werden, die einen Vergleich unterschiedlicher Praktikumskonzeptionierungen hinsichtlich ihrer Lernwirksamkeit, was aktuell noch nicht realisierbar ist, ermöglichen würden.

2.4. Zwischenfazit

Das Fehlen eines hochschulfachdidaktischen Diskurses zum Experimentieren in der Physik machte eine vergleichende Analyse zum Status Quo der experimentellen Ausbildung in Schule, Universität und Forschung nötig, um relevante Aspekte für die Modellierung experimenteller Kompetenz Physikstudierender identifizieren zu können. Im Folgenden werden überblicksartig die zentralen Erkenntnisse der einzelnen Analysen zusammengefasst.

- Experimentieren in der Forschung (Kap. 2.1), das meist dem *context of discovery* zuzuordnen ist, stellt einen komplexen (Handlungs-)Prozess im Spannungsfeld zwischen der Theorie, den Geräten und den experimentellen Handlungen dar. Expertise zeichnet sich dabei über eine hohe Adaptivität der experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten aus.

- Physikunterricht in der Schule soll Bildung im Sinne von *scientific literacy* vermitteln (Kap. 2.2.1). Die zu erwerbenden Fähigkeiten und Fertigkeiten sind in nationalen Bildungsstandards und Kernlehrplänen differenziert festgelegt. Schüler:innen sollen mittels des Experimentierens im Kompetenzbereich *Erkenntnisgewinnung* durch den handelnden Umgang mit physikalischen Inhalten allgemeine kognitive Fähigkeiten und Fertigkeiten erwerben sowie experimentelle und theoretische Erkenntnisse hinsichtlich der Charakteris-

tika wissenschaftlicher Forschung (Nature of Science) reflektieren.

- Schüler:innen sollen dementsprechend durch den Physikunterricht keine Handlungsressourcen in dem Sinne erwerben, sodass sie selbst experimentell forschend tätig sein können, sondern vielmehr durch die handelnde Auseinandersetzung mit physikalischen Inhalten Wissen über die Grundprinzipen physikalischer Erkenntnisgewinnung erwerben (Kap. 2.2.1).

- In Bezug auf die experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten von Schüler:innen am Ende der Oberstufe ist zu vermuten, dass diese aufgrund der diversen Freiheitsgrade und Limitation, die Lehrer:innen bei der Einbettung von Experimenten besitzen, sehr heterogen ausgeprägt sind (Kap. 2.2.2).

- Die universitäre Ausbildung im Bereich des Experimentierens erfolgt einerseits curricular verankert im Rahmen von Laborpraktika und andererseits informell beim Erstellen der Qualifikationsarbeiten innerhalb von professoralen Arbeitsgruppen. Die Studierenden sollen zu Physiker:innen ausgebildet werden, d. h. sie sollen funktionale Handlungsressourcen erwerben, damit sie forschend tätig sein können, was im Rahmen der Qualifizierungsarbeiten geprüft wird (Kap. 2.2.3).

- Laborpraktika als einziger Lehrveranstaltungstyp mit praktischen Anteilen müssten Studierende gezielt auf die Qualifikationsarbeiten vorbereiten, d. h. sie müssen experimentelle Fähigkeiten und Fertigkeiten, funktionale Wissensressourcen im Bereich der physikalischen Denk- und Arbeitsweisen sowie Werthaltungen in Bezug auf Forschungsprozesse (z. B. gute wissenschaftliche Praxis) erwerben (Kap. 2.3.1).

- Zielsetzungen von Laborpraktika an Universitäten sind nur grob von der Konferenz der Fachbereiche Physik vorgegeben. Aufgrund fehlender differenzierter Zielsetzungen und der Freiheit der Lehre an Universitäten existiert deutschlandweit kein einheitliches Curriculum (Kap. 2.3.1).

- Die Zielsetzungen bezogen auf das Experimentieren unterscheiden sich vom Wortlaut her kaum von den schulischen Zielsetzungen. Inhaltlich wird jedoch ein größerer Wert auf statistische Auswertungsverfahren gelegt (Kap. 2.3.1).

- Traditionelle Laborpraktika sind aufgrund eines fehlenden hochschuldidaktischen Diskurses nicht didaktisch fundiert und folgen meist keiner fachmethodischen, sondern der tradierten inhaltlichen Orientierung (Kap. 2.3.2).

- Sowohl in Schule als auch in Universitäten werden oft engmaschig angeleite-

te, hypothetisch-deduktive Experimente von Lehrmittelfirmen eingesetzt, die dem *context of justification* zuzuordnen sind. Es kommt durch die oftmals wenig zu durchdenkenden Experimente zu einer Diskrepanz zwischen den intendierten Zielsetzungen der Lehrveranstaltung sowie den zu erwerbenden experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten und Werthaltungen bezogen auf den Forschungsprozess (Kap. 2.2.3, 2.3.3).

- Aufgrund undifferenzierter Zielsetzungen sowie des fehlenden hochschulfachdidaktischen Diskurses ist in Bezug auf das Experimentieren in Anfängerlaborpraktika unklar, welche experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten Studierende im Rahmen von Laborpraktika erwerben bzw. welche sie mit Blick auf die Anforderungen des Experimentierens im Forschungsprozess erwerben sollten (Kap. 2.3.3).

2.5. Modellierung und Messung experimenteller Kompetenz

In der Diskussion des Status Quo, was Studierende in Laborpraktika lernen sollen, welches Wissen und welche Fähigkeiten und Fertigkeiten sie dazu aus der Schule mitbringen und was sie im Rahmen des Studiums dazu lernen, wurden Defizite in Bezug auf die Zieldimension des wissenschaftlichen Experimentierens deutlich. Diese Defizite sollen im Folgenden als Fehlen einer systematischen Kompetenzmodellierung der experimentellen Kompetenz Physikstudierender präzisiert und damit die Grundlage für die Entwicklung eines Kompetenzmodells gelegt werden.

Im Allgemeinen können bei der Modellierung von Kompetenzen abhängig von der Zielsetzung unterschiedliche Herangehensweisen gewählt werden. Grundsätzliche Aspekte bei der Modellierung von Kompetenzen sind die Wahl der Kompetenzdefinition, welche die zu modellierenden Kompetenzbereiche steuern, sowie die Zielsetzungen und Kompetenzbereiche, die innerhalb einer Lerngelegenheit erworben werden sollen. In diesem Kapitel werden diese Aspekte mit Fokus auf die Modellierung und Messung experimenteller Kompetenz diskutiert. Daraus sollen die für dieses Projekt einsetzbaren methodischen Herangehensweisen bei der Modellierung experimenteller Kompetenz von Physikstudierenden abgeleitet werden.

Für die Modellierung der experimentellen Kompetenz von Physikstudierenden werden nachfolgend für die Festlegung der Kompetenzdefinition zunächst die Konstrukte *Kompetenz* und *Performanz* sowie deren Zusammenhang betrachtet (Kap. 2.5.1). Im Anschluss werden grundlegende Modellierungsaspekte (Kap. 2.5.2) sowie mögliche Assessment-Ansätze zur Erhebung einer passgenauen Datengrundlage (Kap. 2.5.3) diskutiert.

2.5.1. Kompetenz und Performanz

Seit dem PISA-Schock 2000 sowie seit dem danach einsetzenden Bologna-Prozess und den daraus resultierenden Veränderungen im Bildungssystem (Schule, Hochschule) erlebte das psychologische Konstrukt *Kompetenz* einen Aufschwung in der empirischen Bildungsforschung. Unzählige Arbeiten haben sich damit beschäftigt, wie man das Konstrukt Kompetenz allgemein, bezogen auf unterschiedliche Domänen und auch bezogen auf unterschiedliche Bildungssysteme definieren und wie man Kompetenz modellieren und messen kann. Ziel war, durch die Entwicklung und Validierung von Kompetenzmodellen, die die Grundlage für das Messen von Kompetenz darstellen, Bildungsstände von Lernenden einzuschätzen und darauf aufbauend Optimierungen für das Bildungssystem abzuleiten.

Dabei werden abhängig von der Fachrichtung bzw. auch der Perspektive der Forscher:innen unterschiedliche Definitionen des Kompetenzkonstruktes verwendet.[27] Alle Definitionen des Konstruktes *Kompetenz* haben gemeinsam, dass die kognitiven Wissensbestände zusammen mit den darauf aufbauenden Denkprozessen die Grundlage des Konstruktes darstellen (Bromme 1992, Shulman 1986, Weinert 2001a).

Die Kompetenzdefinition nach Weinert 2001b in Erweiterung durch Klieme und Leutner 2006 stellt die dominierende Definition in der kognitionspsychologischen (Bildungs-) Forschung dar. Sie ist u. a. Grundlage der schulischen Bildungsstandards und der Lehrpläne. Demnach stellen Kompetenzen kontextspezifische kognitive Leistungsdispositionen dar, die von affektiven Merkmalen beeinflusst werden. Kompetenz kann "[...] als Verbindung von Wissen und Können in der Bewältigung von Handlungsanforderungen." (Klieme und Hartig 2008, S. 19) verstanden werden. Kompetenzen sind also funktionale Voraussetzung für Handlungen nach bestimmen Anforderungen (Handlungsressource) und zeigen sich in der Performanz. Zentral ist dabei, dass Kompetenzen situationsspezifisch, also innerhalb einer Inhaltsdomäne erlernbar und funktional sind.

Andere Kompetenz-Definitionen, die z. B. berufspädagogischen Untersuchungen (Schlüsselqualifikationen, überfachliche Kompetenzen) zu Grunde liegen, definieren Kompetenz holistischer, indem von einer Verknüpfung und damit nicht nur Beeinflussung der kognitiven und affektiven Aspekte beim kompetenten Handeln ausgegangen wird.

Die Entscheidung für eine spezielle Kompetenzdefinition hat in Forschungsprojekten Konsequenzen für die Modellierung der Kompetenz und für die Wahl des methodischen Zugangs. Dies führt dazu, dass Ergebnisse von Projekten, auch

[27] In dieser Arbeit wird auf eine umfassende Auseinandersetzung mit dem Kompetenzdiskurs verzichtet, stattdessen können folgende Werke genutzt werden: Klieme und Hartig 2008, Müller-Ruckwitt 2008, Vogelsang 2014, Zlatkin-Troitschanskaia und Seidel 2011

wenn sie sich mit ähnlichen Inhaltsbereichen beschäftigen, nicht immer oder nur bedingt vergleichbar sind (u. a. Klieme und Hartig 2008, Vogelsang 2014, Zlatkin-Troitschanskaia und Seidel 2011). Um eine Vergleichbarkeit zur kognitionspsychologischen (Bildungs-)Forschung, die den schulischen Bereich dominiert, sicherzustellen, wird in diesem Projekt für die Modellierung der experimentellen Kompetenz Physikstudierender der Weinertschen Definition (2001) in Erweiterung durch Klieme und Leutner (2006) gefolgt.

Kompetenzen stellen die funktionale Voraussetzung für kompetentes Handeln, also die Performanz, dar. Die Definition des Begriffs *Performanz* geht auf Chomsky (1968) zurück, der das kompetente Handeln von den zugrunde liegenden kognitiven Ressourcen unterschied. Im bildungswissenschaftlichen Bereich wird diese Definition auf Basis des Konstruktes Kompetenz enger gefasst: Performanz ist das mittels Dispositionen gerichtete Handeln zur Bewältigung von Anforderungen in spezifischen Situationen. Bezogen auf die hier diskutierte Modellierung experimenteller Kompetenz ist mit Performanz das experimentelle Handeln zur Bewältigung einer experimentellen Fragestellung in der Physik gemeint.

Eine weitere Herausforderung bei der Modellierung und Messung von Kompetenzen stellt die Frage nach den strukturellen Zusammenhängen bzw. Unterschieden und damit in einem weiteren Sinne nach dem Wirkmechanismus zwischen den individuellen Handlungsressourcen (Kompetenz) und dem kompetenten Handeln (Performanz) dar, welche bis heute noch offen ist (u. a. Klieme und Hartig 2008, Vogelsang 2014).

Als Erklärungsansätze für den Wirkmechanismus und die Zusammenhänge zwischen Kompetenz und Performanz dominieren zwei Theorien den Diskurs, der *Transformationsansatz* und der *Ansatz des strukturellen Unterschieds* (Fischler 2008, Vogelsang 2014). Bei dem *Transformationsansatz* wird davon ausgegangen, dass (deklaratives) "Wissen [...] über einen direkten Transformationsprozess im Handeln wirksam [...]" (Vogelsang 2014, S. 113) wird und Können erzeugt. Bei der Modellierung von Kompetenz wird dementsprechend die Performanz als manifeste Variable und die Kompetenz als latente Variable angenommen (Vorholzer und C. v. Aufschnaiter 2020).

Beim Ansatz des *strukturellen Unterschieds* wird davon ausgegangen, dass Wissen und Können jeweils unterschiedliche innere Strukturen und Logiken aufweisen (Vogelsang 2014). Hierbei wird vermutet, dass Aspekte wie *fallbasiertes Lernen* (Reinhold 2004) oder *Erfahrung* (Gruber und Mandl 1996, Gruber 1999) eine Rolle spielen. Vogelsang (2014) konnte bei der Handlungsvalidierung eines Instrumentes zur Messung professioneller Handlungskompetenz von Physiklehrkräften zeigen, dass bisher keine konsistenten Zusammenhänge zwischen Kompetenz- und Performanzaspekten ermittelt werden konnten, der Transformationsansatz folglich keine Erklärmächtigkeit beim Zusammenhang zwischen Wissen und

Können besitzt. Er vermutet deswegen, dass der Ansatz des strukturellen Unterschieds einen neuen Ansatzpunkt für die Lehrerbildungsforschung liefern könnte. Weiterhin führt er an, dass oftmals Modellierungen auf Basis von theoretischen Annahmen nicht nah genug an die tatsächlichen Handlungsressourcen herankommen.

Einen Ansatz, der eine passgenaue Modellierung und damit einen besseren Zugang zu den den Handlungen zugrunde liegenden Dispositionen ermöglichen würde, liefert Neuwegs *Modell zum Konzept des Lehrerwissens*. Dieses bietet einen Erklärungsansatz für das Zusammenspiel von Lernen, Wissen und Können, das dem Ansatz des *strukturellen Unterschieds* zuzuordnen ist und auch für andere Professionalisierungsbereiche als die Lehrerbildung Strukturierungshinweise liefern kann.

Nach dem Modell gibt es drei unterschiedliche Wissensarten (Neuweg 2011). Unter *Wissen 1* wird (deklaratives) Ausbildungswissen subsumiert, das sich Lernende durch Erfahrung aneignen ("Wissen im Buch"). Das *Wissen 2* stellt ein psychologisches Konstrukt dar und umfasst die kognitiven Strukturen (Dispositionen), die zusammen mit multiplen anderen Einflüssen (Denkstil, epistemologische Überzeugungen, Werthaltungen) als Ergebnis vom Lernen (Wissen 1) entstehen und die Grundlage für kompetentes Handeln darstellen. Bei Experten liegen diese Wissensressourcen stark implizit vor, sodass sie nicht verbalisiert werden können (u. a. Neuweg 2005, Neuweg 2015, Bromme 1992, Chi, Glaser und Farr 1988). *Wissen 3* umfasst das Können, die Innere Logik des Handelnden, das von Wissen 2 gesteuert wird und von Könner:innen demonstriert werden kann.[28] Die innere Logik umfasst dabei Wahrnehmungs-, Entscheidungs- und Handlungsdispositionen, die die Regulation der Performanz beeinflussen (Neuweg 2015). Aufgrund der Explikationsproblematik kann dieses Wissen nur durch Forscher:innen von außen zugeschrieben werden. Neuweg sieht trotzdem in der Rekonstruktion der inneren Logik des Könnens den einzigen Indikator für Können und daher als entscheidenden Anknüpfungspunkt für die Modellierung und Messung von Kompetenzen (Neuweg 2002). Die Zuschreibung impliziter Wissensbestände von außen stellt an dieser Stelle die größte Herausforderung dar (Neuweg 2015). Sie kann nur partiell bzw. symbolisch erfolgen (Bromme 1992) und bedarf eines umfassenden Validierungsansatzes.

Ein konträres Modell, dass eher dem Transformationsansatz zuzuordnen ist, lieferten Blömeke et al. (2015) mit dem Rahmenmodell *Modeling competence as continuum* (Blömeke, Gustafsson und Shavelson 2015). In diesem Modell (siehe Abb. 4) wird ebenfalls angenommen, dass der beobachtbaren Performanz kogni-

[28] Auf eine Auseinandersetzung mit gängigen Theorien zur Struktur des Wissens 2 wird hier verzichtet und stattdessen auf ausgewählte Ansätze verwiesen: Expertenwissen (Ericsson und Charness 1994), Erfahrungswissen (Gruber 1999), implizites Wissen (z. B. Schön 1983), subjektive Theorien (Groeben u. a. 1988).

tive Dispositionen unterliegen. Anders als bei Neuweg wird aber nicht davon ausgegangen, dass Wissen und Performanz unterschiedliche Wissensressourcen darstellen. Vielmehr sei Kompetenz als Prozess mit vielen Schritten zu verstehen. Performanz wird hier folglich als ein Aspekt der Kompetenz verstanden. Dazu wird angemerkt:

> "Different facets have to be integrated, perhaps to be transformed and/or restructured through practical experience. Processes such as the perception and interpretation of a specific job situation together with decision-making may mediate between disposition and performance [...]." (Blömeke, Gustafsson und Shavelson 2015, S. 8)

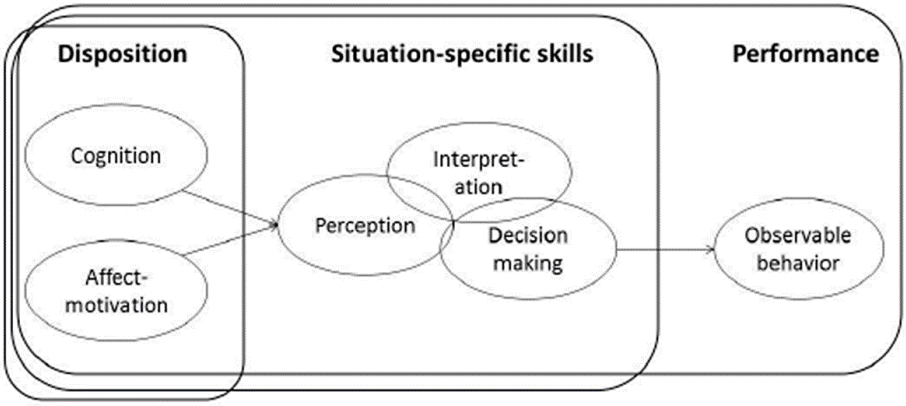


Abb. 4: In der Abbildung ist das Modell *Modeling competence as a continuum* entnommen aus Blömeke, Gustafsson und Shavelson 2015 zu sehen.

Neuwegs Ansatz, Kompetenz und Performanz als unterschiedliche Wissensressourcen mit jeweils eigenen inneren Logiken zu verstehen, erscheint für dieses Projekt funktionaler, da es eine eindeutigere Klassifizierung zulässt. Bisher wurde das Experimentieren an Hochschulen kaum untersucht, d. h. es kann auf keinerlei Modelle zu den für das Experimentieren auf universitärem Niveau relevanten experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten zurückgegriffen werden. Studien der Expertise-Forschung zeigen, dass Expert:innen in komplexen Problemlöseszenarien aufgrund jahrelanger Erprobung ihrer Fähigkeiten in unterschiedlichen Situationen in ähnlichen Kontexten zum Könner werden (u. a. Chi, Feltovich und Glaser 1981). Weiterhin liegen bisher nur eher unspezifische normative Vorgaben für das universitäre Experimentieren vor, sodass hier die Anforderungen, die für das Bewältigen einer Situation notwendig sind und Voraussetzung für die Operationalisierung experimenteller Fähigkeiten und Fertigkeiten (Wissen 2) darstellen, nicht vorliegen. Es kann folglich nur theoretisch vermutet werden, welche Dispositionen von Physikstudierenden deren Performanz beim Experimentieren auslösen und steuern. Dies würde allerdings keine passgenaue Modellierung

bzw. Messung des Wissens 2 erlauben. Für dieses Projekt scheint es dementsprechend aussichtsreicher zu sein die Handlungsressourcen, die für das universitäre Experimentieren funktional sind, anhand der Performanz Studierender beim Experimentieren herauszuarbeiten.

2.5.2. Bestandteile und Modellierungsansätze für Kompetenzmodelle

Mit der Einführung der Bachelor- und Masterstudiengänge im Rahmen des Bologna-Prozesses an deutschen Universitäten stieg auch der Bedarf an fundierten Kompetenzmodellen. Diese würden eine empirisch-fundierte und systematische Beschreibung und Operationalisierung der innerhalb des Studiums und innerhalb einzelner Kurse zu erwerbenden Kompetenzen ermöglichen (u. a. Schaper 2009). Messinstrumente, die aus den Modellen abgeleitet werden könnten, würden eine Evaluation und Optimierung von Studiengängen oder Lehrveranstaltungen hinsichtlich der Lernwirksamkeit ermöglichen und somit wichtige Instrumente für die Qualitätssicherung universitärer Ausbildung darstellen (u. a. Schaper 2009). Weiterhin stellen Kompetenzmodelle die Grundlage für die systematische Gestaltung von Lehr-Lernumgebungen inklusive passgenauer formativer und summativer Feedbackinstrumente dar (u. a. Schaper 2009).

Zlatkin-Troitschanskaia und Kuhn (2010) haben im Rahmen eines Reviews zu Forschungsarbeiten im internationalen Raum über studentische Kompetenzen festgestellt, "[...] that while there were indeed individual research initiatives in various countries, there was hardly any systematic and consolidated research on the valid assessment of student competencies in higher education." (Zlatkin-Troitschanskaia 2021, S. 2). Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch andere Reviews zur Kompetenzmodellierung und -messung im universitären Bereich (Pant u. a. 2009, Webb, Shavelson und Steedle 2018, Zlatkin-Troitschanskaia, Pant u. a. 2016). Im Rahmen des Verbundprojekts *Kompetenzmodelle und Instrumente der Kompetenzerfassung im Hochschulsektor – Validierungen und methodische Innovationen* (KoKoHs) ist über drei Förderperioden mittels diverser Projekte zur Entwicklung und Validierung von Kompetenzmodellen in unterschiedlichen Domänen und für generische Kompetenzen dieser Lücke erfolgreich begegnet worden (Blömeke und Zlatkin-Troitschanskaia 2022). Innerhalb des Forschungsverbundes wurde im Rahmen des Projektes Ko-WADiS (Hartmann u. a. 2015) und des Nachfolgeprojektes ValiDiS (Krüger, Upmeier zu Belzen und Hartmann 2016) die Kompetenzmodellierung und -erfassung zum wissenschaftlichen Denken im naturwissenschaftlichen Studium (Lehramtsstudent:innen) untersucht. Das dabei verwendete Kompetenzmodell zum wissenschaftlichen Denken wurde dafür aus dem Schulbereich adaptiert. Eine systematische Kompetenzmodellierung und -erfassung für das Experimentieren in MINT-Fächern im Rahmen von Laborpraktika an deutschen Universitäten hat es nicht gegeben. Außerhalb des KoKoHs-Projektes wurde im deutschsprachigen Raum von Heidrich (2017) die experimentelle Kompetenz von Physikstu-

dent:innen im Inhaltsbereich Optik unter Nutzung von empirischen Befunden zum Experimentieren in der Schule untersucht. Ihm ist allerdings u. a. aufgrund fehlender empirischer Befunde zum Experimentieren im Hochschulbereich keine valide Messung der experimentellen Kompetenzen gelungen (siehe unten).

Aktuell gibt es deutschlandweit folglich keine validen Kompetenzmodelle für die experimentelle Kompetenz oder Performanz von Physikstudent:innen (u. a. Straube 2016, Heidrich 2017). Anders sieht das für die experimentelle Kompetenz von Schüler:innen aus. Ausgelöst durch die Large-Scale Vergleichsstudien (TIMSS, PISA) sind in den vergangenen zwei Jahrzehnten diverse Forschungsprojekte im Bereich der Entwicklung von Kompetenzmodellen sowie passgenauer Messinstrumente durchgeführt worden. Dabei sind verschiedene Kompetenzmodelle mit unterschiedlichen theoretischen Modellierungsansätzen entstanden. Jedoch wird auch hier angemerkt, dass noch großer Forschungs- und Entwicklungsbedarf hinsichtlich theoretisch begründeter und empirisch abgesicherter Kompetenzmodelle besteht (u. a. Klieme, Avenarius u. a. 2003, Schecker und Parchmann 2006). Hier besteht im Besonderen aktuell noch der Bedarf an der Entwicklung von Wirkmodellen, d. h. der Einbindung der experimentellen Kompetenz in das nomologische Netzwerk fachspezifischer Kompetenzen (Fachwissen, Modellieren, Umgang mit Diagrammen) sowie allgemeiner kognitiver Fähigkeiten (Gut-Glanzmann und Mayer 2018).

Aufgrund der Tatsache, dass für die experimentelle Kompetenz von Physikstudierenden noch keine Kompetenzmodelle zur Verfügung stehen, werden im Folgenden schulische Ansätze zur Kompetenzmodellierung analysiert. Ziel ist, die für die Modellierung notwendigen Arbeitsschritte abzuleiten und zu überprüfen, ob es methodische Ansätze gibt, die für die Modellierung der experimentellen Kompetenz auf universitärem Niveau (adaptiert) funktional sind. Dazu werden Modellierungsaspekte, wie die Funktion des Modells (Kap. 2.5.2.1), die Auswahl der zu modellierenden Dimensionen (Kap. 2.5.2.2) sowie die methodische Herangehensweise bei der Modellierung von unterschiedlichen Dimensionen (Kap. 2.5.2.3 und Kap. 2.5.2.4), diskutiert.

2.5.2.1. Modellierungsaspekt 1 - Ansatz und Funktion des Modells

Kompetenzmodelle sind Mediatoren zwischen abstrakten Lernzielen und der Praxis (Klieme, Avenarius u. a. 2003). Sie beinhalten eine systematische Beschreibung domänenspezifischer Kompetenzen und damit verbunden die Systematik für das Operationalisieren und Messen von Kompetenzen (Schecker und Parchmann 2006, Klieme, Avenarius u. a. 2003). Kompetenzmodelle können hinsichtlich des Modellierungsansatzes unterschieden werden.

Normative Kompetenzmodelle gliedern die Beschreibungen der kognitiven Vor-

aussetzungen, die Lernende für die Lösung von Aufgaben in domänenspezifischen Gegenstands- oder Anforderungsbereichen besitzen müssen (Klieme, Avenarius u. a. 2003). Diese werden deduktiv auf Basis von Beschreibungen, der für die Bewältigung der Anforderungen als notwendig angenommenen Ressourcen abgeleitet (Schecker und Parchmann 2006, Schaper 2009). In deskriptiven Modellen werden hingegen "typische" Muster (kognitiver) Voraussetzungen systematisiert, anhand derer man das Verhalten von Lerner:innen beim Lösen von Aufgaben in domänenspezifischen Gegenstands- oder Anforderungsbereich beschreiben, oder rekonstruieren kann (Schecker und Parchmann 2006, S. 47).

Deskriptive Modelle werden induktiv auf Basis empirischer Analysen (Delphi-Befragungen, Rekonstruktion der Kompetenz aus beobachteter Performanz (Neuweg 2011, Winther 2007)) modelliert und müssen empirisch abgesichert werden. Normative und deskriptive Modelle unterscheiden sich aufgrund des unterschiedlichen Fokus sowie der Modellierungsgrundlage hinsichtlich ihrer Strukturierung (Schecker, K. Neumann u. a. 2016).

Aufgrund der fehlenden normativen Vorgaben für den Erwerb experimenteller Kompetenz auf universitärem Niveau kann in diesem Projekt kein normatives Kompetenzmodell entwickelt werden. Stattdessen wird der deskriptive Modellierungsansatz für die Entwicklung eines Kompetenzmodells für die experimentelle Kompetenz Physikstudierender verwendet. Dazu wird die Performanz beim Experimentieren hinsichtlich typischer Muster analysiert, um daraus die domänenspezifischen Gegenstands- oder Anforderungsbereiche zu rekonstruieren.

Kompetenzmodelle können weiterhin hinsichtlich ihrer Funktion in Kompetenzstruktur-, Kompetenzniveau- und Kompetenzentwicklungsmodelle unterschieden werden. Kompetenzstrukturmodelle bestehen aus einer unterschiedlichen Anzahl an *Dimensionen*, die die übergeordneten Strukturelemente des Kompetenzkonstruktes umfassen. Die Auswahl und Anzahl der Dimensionen erfolgen aufgrund theoretischer Überlegungen. Dimensionen dienen als Grundlage für die Strukturierung von Lernangeboten (präskriptiv) und zur Aufklärung von Varianz in Lernendenleistungen (psychometrisch) (Schecker und Parchmann 2006). Die einzelnen Dimensionen sind typischerweise in *Komponenten* aufgeteilt (Schecker und Parchmann 2006). Komponenten stellen beispielsweise die *Facetten* der betrachteten Kompetenz oder unterschiedliche Inhaltsbereiche dar. Mit Hilfe von Kompetenzstrukturmodellen werden typischerweise die Anforderungen, auf die sich die jeweiligen Kompetenzen beziehen, beschrieben. Sie sind vor allem in Kernlehrplänen zu finden und dienen als Grundlage für die Gestaltung von Lernprozessen.

Kompetenzniveaumodelle, die auch als Kompetenzstufenmodelle bezeichnet werden, besitzen eine zusätzliche Dimension, die eine qualitative Graduierung der für die Bewältigung der Anforderungen benötigten Fähigkeiten beinhaltet (Sche-

cker und Parchmann 2006, Klieme und Leutner 2006). Kompetenzniveaumodelle dienen als Grundlage für die Messung der individuellen Qualitätsausprägungen einer Kompetenz von Lernenden. Die qualitative Graduierung wird entweder über Analysen der Aufgabenschwierigkeiten der standardisierten Testverfahren oder auf Basis von Lernendenleistungen statistisch festgelegt (siehe Kap. 2.5.2.4).

Kompetenzentwicklungsmodelle beinhalten zusätzlich noch eine systematische Strukturierung der zeitlichen Entwicklung der Kompetenz im Verlauf eines Lernprozesses (Hammann 2004). Valide Entwicklungsmodelle stellen aktuell noch ein Forschungsdesiderat in der Physikdidaktik dar (Vorholzer und C. v. Aufschnaiter 2020, Gut-Glanzmann und Mayer 2018, Schecker und Parchmann 2006, Hammann 2004). Es ist bisher noch unklar, wie Lernende strukturell und in welcher zeitlichen Abfolge Kompetenzen erwerben (Schecker und Parchmann 2006). Forschungsarbeiten von Alonzo und Steedle 2009 sowie K. Neumann 2013 zu *learning progressions* oder das Modell von C. v. Aufschnaiter und Rogge 2010 zur Entwicklung des Konzeptverständnisses geben erste Hinweise zur Modellierung individueller Lernprozesse (Vorholzer und C. v. Aufschnaiter 2020). Von Aufschnaiter hat drei Dynamiken zur Entwicklung des physikalischen Begriffsverständnisses identifiziert:

- "Übergang von explorativem über intuitiv regelbasiertes Vorgehen bis zur expliziten Formulierung von Konzepten.
- Erweiterung der inhaltlichen Breite des Verständnisses: Es werden mehr inhaltliche Aspekte innerhalb eines Gedankenganges zusammen gebracht.
- Wechsel der Erfahrungsbasis zu neuen Regeln und darauf bezogenen Konzeptualisierungen." (C. v. Aufschnaiter 2003, S. 9)

Basierend darauf hat Saniter die Entwicklung des begrifflichen Verständnisses im universitären Physiklernen untersucht und festgestellt, dass Studierende mit zunehmender Lernprogression schneller und systematischer beim Wechsel zwischen Inhaltssegmenten werden und höhere Komplexitätsstufen erreichen (Saniter 2003).

In diesem Projekt fällt die Wahl u. a. aufgrund der fehlenden Vorarbeiten und normativen Vorgaben auf die Entwicklung eines Kompetenzstrukturmodells. Ein Niveaumodell kann aufgrund der fehlenden Vorgaben aktuell noch nicht realisiert werden, da die Festlegung von Niveaus voraussetzt, dass mehrere unterschiedlich komplexe Experimentieraufgaben, die auf einem multidimensionalen Kompetenzstrukturmodell basieren, eingesetzt werden und eine ausreichend große Anzahl an Probanden diese bearbeitet. Das gleiche gilt für Entwicklungsmodelle. Hierfür müssten im Vorfeld schon die Dimensionen mit den Anforderungs- und Gegenstandsbereichen vorliegen, um standardisiert Experimentieraufgaben entwickeln

zu können, die eine Messung von Entwicklungsverläufen erlauben würden. Der in diesem Projekt entwickelte Vorschlag für ein Kompetenzstrukturmodell kann in Folgeprojekten als Entwicklungsgrundlage für die beiden anderen Modellierungen genutzt werden.

2.5.2.2. Modellierungsaspekt 2 - Auswahl der Dimensionen

Nach der Analyse der grundlegenden Modellierungsansätze und Funktionen sollen im Folgenden die Bestandteile von Kompetenzmodellen für die experimentelle Kompetenz aus dem schulischen Bereich diskutiert werden. Eine analytische Herausforderung stellt hier, ebenso wie bei der Modellierung fachinhaltlicher Kompetenz, die Heterogenität unter den verwendeten Ansätzen zur Modellierung experimenteller Kompetenz dar. Weiterhin werden gleiche Begrifflichkeiten mit unterschiedlichen Bedeutungen oder andersherum gleiche Bedeutungen mit unterschiedlichen Begrifflichkeiten verwendet. "Die Vielfalt der Modelle zu einer Kompetenz ermöglicht zwar facettenreiche Zugriffe auf das Konstrukt, erschwert aber gleichzeitig die Einordnung und wechselseitige Bezugnahme von Befunden, weil Unterschiede in den Modellierungen nicht immer leicht erkennbar sind." (Vorholzer und C. v. Aufschnaiter 2020, S. 2). Es wird deswegen nachfolgend eher ein Fokus auf die Identifikation typischer Dimensionierungen von Kompetenzmodellen zur experimentellen Kompetenz sowie auf die unterschiedlichen Möglichkeiten der Modellierung einzelner Anforderungs- und Gegenstandsbereiche gelegt. Ziel ist, anhand der unterschiedlichen theoretischen Rahmungen und Strukturierungsansätze funktionale Herangehensweisen für die Modellierung der experimentellen Kompetenz auf universitärem Niveau zu identifizieren und hinsichtlich ihrer Funktionalität für die Modellierung eines deskriptiven Kompetenzstrukturmodells für die experimentelle Kompetenz Physikstudierender zu diskutieren.

Für die Entwicklung der Dimensionen und Komponenten von Kompetenzmodellen müssen Kompetenzkonstrukte für den Einsatz im Rahmen von empirischen Studien als psychometrisch handhabbares Konstrukt präzise formuliert und von anderen Konstrukten abgegrenzt sein (Gut-Glanzmann und Mayer 2018, S. 123). Dazu gehören eine präzise Beschreibung der Anforderungssituation, eine Eingrenzung des fachlichen Kontextes, die präzise Beschreibung der Handlungen oder Dispositionen sowie eine Zusammenstellung der Wissensbestände, die den Handlungen zugrunde liegen bzw. diese bedingen (Gut-Glanzmann und Mayer 2018, S. 123).

Bezüglich der Anzahl der Dimensionen müssen zwei Aspekte bedacht werden. Erstens sollte ein Kompetenzmodell aus nicht mehr als drei Dimensionen bestehen, damit Nutzbarkeit durch Lehrende gesichert ist (Schecker, Fischer und Wiesner 2004). Zweitens beeinflusst die Anzahl der Dimensionen die in einer

standardisierten Erhebung einzusetzenden Aufgabenstellungen. Das bedeutet: Je mehr Dimensionen ein Modell hat, desto mehr Aufgabenstellungen müssen entwickelt werden, um alle Komponenten der jeweiligen Dimensionen zu adressieren (Schecker und Parchmann 2006).

Die inhaltliche Ausgestaltung der Dimensionen wird von dem jeweils zu messenden Konstrukt und dessen Abgrenzung gesteuert. Vorholzer und Von Aufschnaiter (2020) haben in einem Review zu fachinhaltlichen Kompetenzmodellen für die Schule sieben Dimensionen identifiziert, die abhängig von der Zielsetzung der Projekte in unterschiedlicher Anzahl und Kombination genutzt werden. Es zeigt sich, dass die meisten Kompetenzstrukturmodelle mindestens die Dimensionen Inhaltsbereiche (z. B. Basiskonzepte, Sachgebiete) und Anforderungsbereiche (z. B. Vernetzung, Denkprozesse, Abstraktion) umfassen. Meistens stellt die dritte Dimension einen der Kompetenzbereiche (Fachwissen, Erkenntnisgewinnung, Kommunikation, Bewertung) dar. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei der Modellierung schulischer Kompetenzen eine möglichst hohe Passung zu den nationalen Bildungsstandards erreicht werden soll. Das Kompetenzstrukturmodell der Nationalen Bildungsstandards für Physik umfasst die Dimensionen *Kompetenzbereich*, *Basiskonzept* und *Anforderungsbereich*. Schulische Kompetenzstrukturmodelle für die experimentelle Kompetenz sind meistens ein- (z. B. Schreiber 2009) oder zweidimensional (z. B. Mayer 2007) strukturiert, da das Experimentieren in der Dimension *Kompetenzbereich* der Komponente *Erkenntnisgewinnung* zugeordnet ist. Diese Dimension fällt dementsprechend weg.

Mit Blick auf die Entwicklung eines Kompetenzstrukturmodells für die experimentelle Kompetenz Physikstudierender kann festgehalten werden, dass anders als in der Schule für die Universitäten und hier im Speziellen in den Modulbeschreibungen der Laborpraktika keine normativen Dimensionen, die deutschlandweit konsensfähig sind, zentral vorgegeben sind. Folgt man dem Muster der schulischen Dimensionen, dann werden für die Entwicklung eines Kompetenzstrukturmodells eine Dimension *Inhaltsbereiche*, die die physikalischen Inhalte für das Laborpraktikum strukturiert, benötigt. Weiterhin sollte eine Dimension, in der die zu erwerbenden experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten, wie in der Schule in der Dimension *Kompetenzbereich*, enthalten sein. Und schlussendlich wird eine Dimension benötigt, die, wie die Dimension *Anforderungsbereich* in schulischen Modellen, eine Form der Qualitätszuweisung z. B. die Qualitätsausprägungen oder das kognitive Anforderungsniveau für die Fähigkeiten und Fertigkeiten in einem Inhaltsgebiet systematisiert.

2.5.2.3. Modellierungsaspekt 3 - Theoretische Rahmung und Differenzierung inhaltlicher und fachmethodischer Dimensionen

Bei der Modellierung von Kompetenzen steuert die Wahl der theoretischen Rahmung die Festlegung und die Strukturierung der einzelnen Dimensionen und, welche Aspekte das modellierte Konstrukt umfasst und welche nicht. Für den schulischen Bereich werden für die Modellierung der experimentellen Kompetenz (*Kompetenzbereich Erkenntnisgewinnung*) typischerweise vier theoretische Rahmungen genutzt: *Scientific reasoning* (u. a. Schauble 1990, Zimmerman 2007), *Inquiry Skills* (u. a. Wellnitz, Fischer u. a. 2012, Theyßen, Schecker, K. Neumann u. a. 2016), *Problem-solving* (u. a. Klahr 2000, Hammann 2004, Emden 2011, Schreiber 2012, Gut u. a. 2014), *Conceptual Understanding* (u. a. Gott und Duggan 1996).

In den Kompetenzmodellen von Large-Scale Assessments, wie z. B. der IQB-Länderstudie, werden vor allem die rein kognitiven Teilprozesse bei der Modellierung fokussiert, da diese ökonomisch ohne Realexperimente erhoben werden können. Dieser Erhebungsansatz wird allerdings von Fachdidaktikern unter anderem auf messtheoretischer Ebene kritisiert (u. a. Gut-Glanzmann und Mayer 2018, Schreiber 2012, Meier 2016, Schecker, K. Neumann u. a. 2016). Sie versprechen sich auf Basis von Realexperimenten von der Modellierung kognitiv-manipulierender (z. B. Variablenkontrollstrategien Nehring und Schwichow 2020, Schwichow und Nehring 2018) und auch praktisch-manueller experimenteller Fähigkeiten und Fertigkeiten (Schecker, K. Neumann u. a. 2016, Emden 2011, Schreiber 2012, Meier 2016) einen besseren Zugang zu den kognitiven Dispositionen bei der Messung experimenteller Kompetenz. Als Resultat dieser Kritik sind vermehrt Kompetenzmodelle entstanden, die explizit neben den kognitiven auch handlungsorientierte experimentelle Fähigkeiten und Fertigkeiten adressieren.

Die Dimensionen und Facetten eines Kompetenzmodells für die experimentelle Kompetenz werden abhängig davon, wie Experimentieren durch die theoretische Rahmung definiert wird, festgelegt. Für die Systematisierung der Facetten der Dimension *Kompetenzbereich*, also die Festlegung, welche experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten modelliert werden sollen, werden zwei unterschiedliche Ansätze genutzt.

Beim *Teilprozessansatz* wird der Experimentierprozess sequenziert, d. h. in typische Schritte, die innerhalb eines Erkenntnisprozesses absolviert werden. Dabei werden, wie beim theoretischen Ansatz *skills*, den Teilprozessen beim Experimentieren (typischerweise: Planung, Durchführung, Auswertung) jeweils spezifische Prozessfähigkeiten zugeordnet (u. a. Emden 2011, Schreiber 2012, Meier 2016, Wellnitz, Fischer u. a. 2012, Mayer 2007). Das *Strukturmodell zum Wissenschaftlichen Denken (scientific reasoning)* von Mayer stellt ein Beispiel für den Teilprozessansatz dar und basiert auf der Annahme, dass der Prozess der naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung einen komplexen Problemlöseprozess darstellt. Als Grund-

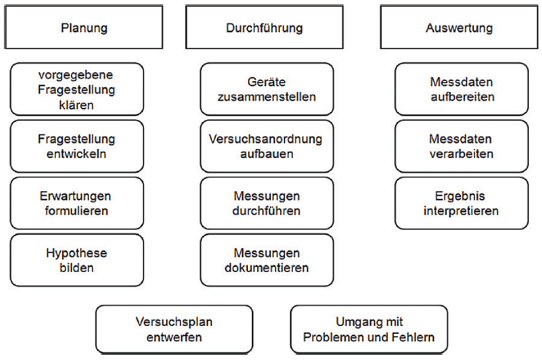
lage für die Modellierung von vier Prozessvariablen als kognitive Denkprozesse des Experimentierens (z. B. Naturwissenschaftliche Fragen formulieren, Untersuchungen planen) werden die Arbeiten von Klahr und Dunbar 1988 genutzt. Klahr und Dunbar modellieren ausgehend von der Problemlösungsforschung (Kognitionspsychologie) die kognitiven Denkprozesse bei der Problemlösung und berücksichtigen dabei das Vorwissen der Probanden (Klahr 2000). Die Teilprozesse von komplexen Problemlösungen werden dabei als Ergebnis einer kognitiven dualen Suche im Hypothesen- und im Experimentierraum modelliert. Die drei Hauptkomponenten sind die *Suche im Hypothesenraum*, das *Testen von Hypothesen* und die *Analyse von Evidenz* (Klahr 2000). Neben Prozessvariablen beinhaltet Mayers Modell auch Personenvariablen, wie (deklaratives) Wissen zu Konzepten und Methoden sowie die kognitiven Fähigkeiten (Mayer 2007). Auf Basis des Modells von Mayer sind diverse weitere Forschungsarbeiten entstanden (Walpuski u. a. 2010, Wellnitz, Fischer u. a. 2012, Kauertz 2008, Arnold, Kremer und Mayer 2013, Straube 2016, Brüggemann 2021).

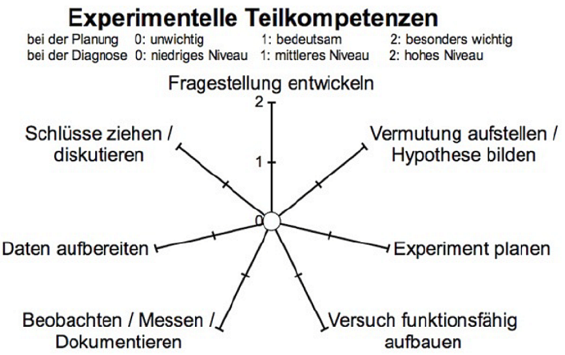
Zwei Kompetenzmodelle für die experimentelle Kompetenz für die schulische Ausbildung, die dem Teilprozessansatz entsprechen, sollen hier beispielhaft vorgestellt werden. Das Kompetenzmodell von Schreiber (2012) ist in drei Experimentierphasen Planung, Durchführung und Auswertung gegliedert (siehe Abb. 5 oben links). Die Experimentierphasen sind jeweils noch in Subphasen gegliedert. An seinem Modell war besonders[29], dass er einen höheren Fokus auf die experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten im Bereich der Durchführung (Geräte zusammenstellen, Versuchsanordnung aufbauen, Messungen durchführen, Messungen dokumentieren) legte und damit nicht nur vorrangig kognitive experimentelle Fähigkeiten und Fertigkeiten modellierte. Als zweites Kompetenzmodell soll hier das *alles»könner-Modell* (Maiseyenka 2014) beschrieben werden, das für die Planung von Physikunterricht mit experimentellen Anteilen und für die Diagnose von Schüler:innenfähigkeiten auf Basis von Schreibers Modell entwickelt wurde (siehe Abb. 5 oben rechts).[30] Ziel war, die experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten so differenziert zu beschreiben, dass sie praktikabel für den Einsatz im Schulunterricht sind. Es werden sieben Teilkompetenzen der experimentellen Kompetenz definiert (Fragestellung entwickeln bis Schlüsse ziehen/diskutieren). Jeder Teilkompetenz sind Aspekte zugeordnet, die dafür besonders relevant sind (siehe Abb. 5 unten).

Beim *Problemtypenansatz* werden experimentelle Fähigkeiten und Fertigkeiten nicht danach systematisiert, welcher Prozessschritt absolviert wird, sondern danach, welche Problemstellungen (Problemtypen) mit ihnen gelöst werden können.

[29] Einen sehr differenzierten Überblick über bestehende Kompetenzmodelle für die experimentelle Kompetenz im Bereich Schule lieferte Emden (2011) in seiner Dissertation.

[30] Basierend auf den zwei Modellen ist an der RWTH Aachen die Plattform FLexKom entstanden, die Schüler:innen beim Erwerb experimenteller Kompetenzen unterstützen soll (Goertz u. a. 2019).





Teilkompetenz	Beschreibung
Fragestellung entwickeln	• zielgerichtet • konkret • auf theoretische Annahmen bezogen
Vermutung aufstellen / Hypothese bilden	• basiert auf wissenschaftlicher Fragestellung • Vermutung: Bezug auf Vorerfahrung • Hypothese: Bezug auf theoretisches Vorwissen • Rahmen für Messungen und Beobachtungen
Experiment planen	• Zielklarheit • Geräte und Materialien festlegen • zu untersuchende Größen klären • Variablenkontrolle beachten
Versuch funktionsfähig aufbauen	• Geräte zusammenstellen • Versuchsanordnung aufbauen • Funktionsfähigkeit kontrollieren • systematische Fehler suchen
Beobachten / Messen / Dokumentieren	• kriteriengeleitet beobachten • sorgfältig, genau, mehrfach messen • vollständig, sorgfältig und genau dokumentiert
Daten aufbereiten	• Daten tabellarisch, grafisch und textlich aufbereiten • Formeln anwenden • nach Zusammenhängen suchen • vergleichend analysieren
Schlüsse ziehen / diskutieren	• Ergebnisse interpretieren • Rückbezug auf Frage / Hypothese / Vermutung nehmen • Hypothese / Vermutung kritisch reflektieren und ggf. überarbeiten • Fehler analysieren • eigene Position in Diskussion vertreten

Abb. 5: In der Abbildung sind zwei Kompetenzmodelle für die experimentelle Kompetenz auf schulischen Niveau zu sehen (oben links: entnommen aus Schreiber 2009, oben rechts: entnommen aus Maiseyenka, Schecker und Nawrath 2013). Unten: Präzisierung der Facetten des Modells von Maiseyenka (Maiseyenka 2014)

Experimentelle Fähigkeiten und Fertigkeiten werden hier also nicht nur bezogen auf einen Prozessschritt, sondern bezogen auf den gesamten Prozess, gesehen. Problemtypen können z. B. über die Art der Erkenntnis (Ruiz-Primo und Shavelson 1996), das für das Problemverständnis notwendige Konzeptwissen (Millar u. a. 1996) oder das für die Lösung notwendige deklarative und prozedurale Methodenwissen (z. B. fragengeleitetes Untersuchen kausaler Zusammenhänge oder skalenbasiertes Messen quantitativer Größen (Gut u. a. 2014)) (Gott und Duggan 1996, Gut u. a. 2014) modelliert werden (Gut-Glanzmann und Mayer 2018, S. 131). Bei der Modellierung von Problemtypen nach dem Ansatz des Methodenwissens sind auch konstruktive und technisch-konstruktive Problemstellungen, die typischerweise in den Experimentierphasen Aufbau und Durchführung eine Rolle spielen, möglich (Gut-Glanzmann und Mayer 2018). Gott und Duggan, deren Theorie dem Problemtypenansatz zuzuordnen ist, sind der Meinung, dass "[...] skills have a *distinct knowledge base* [Anm. d. A.] which is connected directly and necessarily with the understanding of scientific evidence." (Gott und Duggan 1996, S. 792). Die Wissensbasis entspricht dabei den *concepts of evidence*, die das Methodenwissen für empirische Untersuchungen (procedural unterstanding) umfassen (Gut-Glanzmann und Mayer 2018). An der Modellierung ist besonders, dass das Verstehen und die Anwendung der concepts of evidence "[...] require a higher level of understanding than skills because they require an appreciation of the task as a whole." (Gott und Duggan 1996, S. 802). Basierend auf diesen Annahmen definieren sie zwölf *concepts of evidence* (z. B. Variable Identification, Choice of Instruments, Accuracy) als innere Differenzierung, die zu den drei Bereichen *design*, *measurement* und *data handling* zugeordnet sind.

Mit Blick auf die Modellierung experimenteller Kompetenz auf schulischem Niveau sind bezüglich der Validität der beiden unterschiedlichen Ansätze für die Modellierung der Facetten noch einige Aspekte offen (Gut-Glanzmann und Mayer 2018). Neben der Frage nach der Unabhängigkeit der experimentellen Kompetenz (Gut-Glanzmann 2012) bzw. der einzelnen experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten vom Fachwissen (u. a. Schwichow und Nehring 2018) und damit vom jeweiligen Fachkontext (Theyßen, Schecker, K. Neumann u. a. 2016, Wellnitz, Hecht u. a. 2017, Nehring und Schwichow 2020), der Abhängigkeit der experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten vom Methodenwissen (Gut u. a. 2014), ist auch noch die Frage nach der Messbarkeit von Teilprozessen innerhalb eines Problemtyps offen. Weiterhin stellt sich die Frage danach, welche Dimensionen dem Konstrukt experimenteller Kompetenz unterliegen (Vorholzer und C. v. Aufschnaiter 2020, Wellnitz, Hecht u. a. 2017) und welche domänenspezifischen und -unspezifischen kognitiven Personenmerkmale (z. B. mathematische Fähigkeiten) das Konstrukt experimentelle Kompetenz wie beeinflussen (Härtig, K. Neumann und Erb 2017). Insgesamt kann aktuell folglich noch nicht eindeutig gesagt werden, welche Modellierung der experimentellen Kompetenz am passgenauesten und damit am funktionalsten für die Entwicklung eines Kompetenzstrukturmodells ist.

Es stellt sich nun die Frage, welche Modellierungen oder methodischen Ansätze für die Entwicklung der inhaltlichen und fachmethodischen Dimensionen für ein Kompetenzstrukturmodell experimenteller Kompetenz Physikstudierender aus dem fachdidaktisch tiefgehend erforschten Gebiet der experimentellen Kompetenz von Schüler:innen für ein Kompetenzmodell auf universitärem Niveau funktional sind.

Die vergleichende Analyse (Kap. 2.4) der Zielsetzung des Experimentierens in der Schule, im Studium und in der Wissenschaft hat gezeigt, dass diese sich deutlich in ihrem Bildungsanspruch unterscheiden. Die theoretischen Rahmungen, die für die Modellierung der experimentellen Kompetenz auf Schulniveau genutzt werden, fokussieren aufgrund des Bildungsanspruchs der Schule Schüler:innen einen Einblick in den Bereich der wissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung zu liefern, jeweils nur Ausschnitte der für den komplexen Prozess benötigten Fähigkeiten und Fertigkeiten. Weiterhin werden bei der Modellierung zwar mittlerweile nicht mehr nur kognitive, sondern auch handlungsorientierte Fähigkeiten und Fertigkeiten mit einbezogen, jedoch ist zu vermuten, dass die handlungsorientierten Modellierungen nicht passgenau zu den für das universitäre Experimentieren benötigten Fähigkeiten und Fertigkeiten sind. Hier ist mit Blick auf die für das Experimentieren auf universitärem Niveau benötigten experimentellen Handlungsressourcen (Kap. 2.1) zu vermuten, dass mehr experimentelle Fähigkeiten und Fertigkeiten relevant werden, und dass sich die Strukturierung dieser aufgrund der deutlich höheren Komplexität des gesamten Experimentierprozesses von der schulischen Modellierung unterscheiden. Insgesamt kann deswegen festgehalten werden, dass die Modellierungsansätze für die experimentelle Kompetenz von Schüler:innen nicht für ein Kompetenzstrukturmodell experimenteller Kompetenz von Studierenden übernommen werden können.

Auf der methodischen Ebene können allerdings für die Entwicklung der inhaltlichen Dimension (*Inhaltsbereiche*) und der fachmethodischen Dimension (*Fachmethodik*) Anleihen beim Vorgehen bei der schulischen Kompetenzmodellierung gemacht werden. Für die Entwicklung einer Dimension, die die physikalischen Inhaltsgebiete strukturiert, kann auf normative Vorgaben durch die Konferenz der Fachbereiche Physik (Empfehlung der Konferenz der Fachbereiche Physik 2010) oder auch Modulbeschreibungen zurückgegriffen werden. Dies scheint vor dem Hintergrund, dass die Mehrheit der deutschen Laborpraktika ähnliche Experimente von Lehrmittelfirmen einsetzen, erfolgversprechend zu sein. Dieser Ansatz kann jedoch bei der Modellierung einer Dimension, die die fachmethodischen experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten strukturiert, nicht realisiert werden. Hier scheint es aussichtsreicher zu sein, die Performanz von unterschiedlich fähigen Probanden beim universitären Experimentieren zu analysieren, um einen Zugang zu den charakteristischen und strukturierenden Handlungsressourcen zu erhalten.

In Bezug auf die innere Differenzierung einer fachmethodischen Dimension wäre zwar der *Teilprozessansatz* aufgrund der häufigeren Nutzung angezeigt. Dieser Ansatz wird häufig verwendet, da er die typische Strukturierung von experimentellen Aufgabenstellungen abbildet (Nawrath, Maiseyenka und Schecker 2011, Gut-Glanzmann und Mayer 2018). Jedoch ist hier fraglich, ob die experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten auf universitärem Niveau aufgrund des stark iterativen Vorgehens und des hohen Reflexionsanteils innerhalb des Gesamtprozesses (Kap. 2.1) den Prozessschritten passgenau zugeordnet werden können. Eine Modellierung über den *Problemtypenansatz* erscheint hier nicht vielversprechender zu sein, weil vermutet wird, dass die modellierten Problemtypen für den schulischen Bereich auf universitärer Ebene zu den grundlegenden experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten gehören, die bei jedem Experimentierprozess (der deutlich komplexer als in der Schule ist) genutzt werden müssen.

2.5.2.4. Modellierungsaspekt 4 - Theoretische Rahmung und Differenzierung der Dimension *Qualitätsausprägung*

Kompetenzmodelle ermöglichen es, einzelnen Fähigkeiten (Facetten) Qualitätsausprägungen zuzuschreiben. Die Qualitätsausprägungen werden in schulischen Kompetenzmodellen in einer eigenen Dimension (*Anforderungsbereich*) strukturiert. Im Folgenden werden grundsätzliche Modellierungsansätze von Qualitätsmaßen[31] hinsichtlich ihrer Eignung für die Entwicklung eines Kompetenzstrukturmodells experimenteller Kompetenz auf universitärem Niveau diskutiert.

Vorholzer und von Aufschnaiter (2020) haben bei ihrer Systematisierung von Kompetenzmodellen zum Fachwissen mehrere gestufte Dimensionen identifiziert: Vernetzung (Kauertz 2008, Bernholt, Parchmann und Michael Lamport Commons 2009), Denkprozess (kognitive Anforderung Schecker und Parchmann 2006; kognitive Aktivität Kauertz, Fischer und Mayer 2010), Abstraktion (Anforderungsbereiche Beschlüsse der Kultusministerkonferenz 2005, Konzeptualisierungsniveaus C. v. Aufschnaiter und Rogge 2010) und Angemessenheit (Kleickmann u. a. 2010). Diese Ansätze zur Entwicklung einer Dimension *Qualitätsausprägung* können in drei Bereiche systematisiert werden: *A priori*, *post hoc* und *theoriebasierte Operationalisierung vorher mit empirischer Beschreibung der Niveaus auf Basis empirischer Daten* (Mayer und Wellnitz 2014).

Die *a priori* Definition von Gradierung besitzt den Vorteil, "[...] dass bereits bei der Aufgabenkonstruktion vermutete schwierigkeitserzeugende Merkmale operationalisiert und empirisch geprüft werden können." (Mayer und Wellnitz 2014, S. 24). Beispiele hierfür stellen die Arbeiten von Kauertz 2008 und Bernholt

[31] Die Qualitätsausprägungen müssen dabei nicht zwingend ordinalskaliert sein (Schecker und Parchmann 2006

2010 dar.[32] Kauertz nutzt den Ansatz der *hierarchical complexity* (M. L. Commons u. a. 1998). "Die Idee der hierarchischen Komplexität besteht darin, dass Anforderungen beschrieben werden, zu deren Bewältigung es vorteilhaft oder sogar notwendig ist, kognitive Inhalte zu neuen komplexen Konstrukten zusammenzusetzen." (Woitkowski 2015, S. 79). Nach diesem Ansatz wurden fünf schwierigkeitserzeugende Merkmale (Fakt, Fakten, Zusammenhang, unverbundene Zusammenhänge, verbundene Zusammenhänge, übergeordnetes Konzept) entwickelt und empirisch geprüft. Nach diesem Ansatz ergibt sich die Schwierigkeit von Aufgabenstellungen auf Basis einer wachsenden Anzahl von durchzuführenden Verknüpfungsoperationen (Bernholt 2010). Bernholt adaptierte das Modell von Commons "[...] verzichtete auf die Ausweisung eines Tätigkeitsprofils und orientierte sich vorwiegend an einer Hierarchisierung durch die Verknüpfungsqualität der Inhaltselemente." (Bernholt 2010, S. 125).

Einen anderen *a priori* Ansatz für die Einschätzung der Qualität von Experimentierprozessen wählte Heidrich (2017) auf Basis seines performanzorientierten Experimentiertests für die experimentelle Kompetenz von Physikstudierenden im Inhaltsbereich Optik. Er adaptierte dafür Kompetenzfacetten aus dem schulischen Bereich (Heidrich 2017, Anhang A1, S. 172-182) sowie die Dreiteilung nach dem SDDS-Modell von Klahr und Dunbar (2000). Er modelliert den experimentellen Prozess als iterativen Kreislauf, der mehrfach durchlaufen werden kann. Als Qualitätsmaße werden drei Aspekte definiert, die basierend auf einem additiven Verständnis eine differenzierte Einschätzung der Qualität der Handlungen beim Experimentieren erlauben sollen: *Richtigkeit*, *Strukturiertheit* und *Zielorientierung* (Heidrich 2017, S. 24). Bei dem Aspekt *Richtigkeit* werden die experimentellen Handlungen der Planung und der Umsetzung hinsichtlich ihrer Korrektheit[33] bewertet. Mit dem Qualitätsmaß *Strukturiertheit* wird die plausible Wahl (auf Basis von Reflexion und Evaluation der bisherigen Handlungen) des nächsten Handlungsschrittes beurteilt. Dazu definiert er drei Übergänge, die hinsichtlich ihrer Plausibilität eingeschätzt werden sollen: Idealtypische Abfolge, Kontrolle des Vorgehens, Fehlerkorrektur (Heidrich 2017, S. 27f).[34] Die *Zielorientierung* bezieht sich anders als die anderen zwei Aspekte nicht auf einzelne Handlungen, sondern auf den gesamten Prozess. Dazu wird analysiert, welche Strategien (z. B. Analogiebildung, Ausprobieren, ...) die Experimentierenden beim Experimentieren nutzen. Indikator ist die Anzahl der für die Beantwortung der Fragestellung benötigten Experimentierprozesszyklen.[35] Die Handlungen der Studierenden werden anhand ihrer Ergebnisprotokolle eingeschätzt. Es ist dadurch gelungen, die *Korrektheit* und die *Zielorientierung* einzuschätzen. Der Aspekt *Strukturiertheit* konnte nicht valide erhoben werden. Es wird vermutet, dass dies am Auswerteverfahren bzw.

[32] Eine ausführliche Gegenüberstellung der Ansätze zusammen mit weiteren Arbeiten im Bereich der schwierigkeitserzeugenden Merkmale ist bei Woitkowski 2015 S. 79 ff. zu finden

[33] Richtige Formel, Variablen, Skizze (Heidrich 2017, S. 304)

[34] Gliederung der Notizen nach dem Dreischritt Planung, Durchführung, Auswertung sowie es werden Fehler erkannt und gelöst (Heidrich 2017, S. 304).

[35] Fortschritt erkennbar und stringent (Heidrich 2017, S. 304)

an der Operationalisierung des Aspektes liegt. Hier ist nun noch offen, ob die gewählten drei Aspekte mit der jeweiligen Operationalisierung der Komplexität bezogen auf die Qualität des Experimentierens auf universitärem Niveau gerecht werden können.

In den großen Large Scale Erhebungen (TIMSS, PISA) werden die Stufen oftmals *post hoc* zugeschrieben. Dieses Verfahren wird verwendet, wenn nicht auf fundierte Annahmen über die Kompetenzstufung zurückgegriffen werden kann (Schecker und Parchmann 2006, Vorholzer und C. v. Aufschnaiter 2020, Mayer und Wellnitz 2014). Dazu werden unter Nutzung des Rasch-Modells Personen- und Itemparameter einander gegenübergestellt (Woitkowski 2015). Die dabei gefundenen Stufen werden durch Analyse der Anforderungsmerkmale der Aufgabenstellungen inhaltlich charakterisiert (Klieme 2000, Schecker, K. Neumann u. a. 2016). Herausfordernd an der Methodik ist, dass die Anzahl der Stufen weder empirisch klärbar (abh. von Aufgabenstellung) noch theoretisch ableitbar (Entscheidungssituation) ist (Schecker und Parchmann 2006).

Der dritte Ansatz stellt das Standard-Setting dar, bei dem die Kompetenz vor der Erhebung theoriebasiert graduiert und Niveaus auf Basis der empirischen Daten nach der Erhebung beschrieben werden. Bei der Evaluation der Bildungsstandards mittels der IQB Länderstudie wurde für die Entwicklung der Stufen als Standardsetting die Bookmark-Methode genutzt (Schecker, K. Neumann u. a. 2016). Mit Standardsetting ist die Festlegung diskreter, qualitativ unterscheidbarer Bereiche anhand von Schwellenwerten und der inhaltlichen Beschreibung der Kompetenzstufen gemeint (Schecker, K. Neumann u. a. 2016). Beim Bookmark-Verfahren werden die Kompetenzstufen (bzw. Schwellenstufen) auf Grundlage der empirischen Schwierigkeiten der Testaufgaben in einem mehrstufigen Verfahren durch ein Expertengremium festgelegt (Schecker, K. Neumann u. a. 2016). Woitkowski führt bezüglich der Methodik an, dass diese, wie auch die post hoc Stufenbildung bei TIMSS und PISA, ohne ein zugrunde liegendes Kompetenzstrukturmodell auskommt, wodurch eine Übertragbarkeit auf andere Itembestände herausfordernd sei (Woitkowski 2015). Schecker et al. haben dies überprüft, indem sie die Stufen, die für den Bereich Optik und Elektrizitätslehre entwickelt worden sind, am Inhaltsbereich Mechanik erprobt haben. Es zeigte sich eine gute Passung: Die Items sind im Mittel, jedoch nicht signifikant, etwas leichter als die äquivalenten Items in den anderen beiden Inhaltsbereichen. Dies führen sie darauf zurück, dass die Mechanik alltagnäher ist und dementsprechend die kognitive Anforderung bei der Lösung der Items niedriger ist (Schecker, K. Neumann u. a. 2016, S. 210).

Für die Entwicklung einer Dimension *Qualitätsausprägung* für ein Kompetenzstrukturmodell experimenteller Kompetenz Physikstudierender lässt sich zusammenfassend festhalten, dass sich die drei gängigen Modellierungsansätze nicht für die Übernahme für das vorliegende Projekt eignen. Bei allen drei Ansätzen ist das Vorhandensein eines Kompetenzstrukturmodells mit den Dimensionen

Kompetenzbereich und *Inhaltsbereich* die Voraussetzung für die Entwicklung der Dimension. Weiterhin ist für alle drei Ansätze die Bearbeitung diverser unterschiedlich komplexer Aufgabenstellungen, die jeweils die Facetten der Dimensionen adressieren, durch eine sehr hohe Zahl an Probanden notwendig. Diese beiden Voraussetzungen können im Rahmen des hier vorgestellten Projektes nicht geleistet werden.

Auf der methodischen Ebene können jedoch einzelne Aspekte für die Entwicklung einer Dimension *Qualitätsausprägung* funktional sein. Eine a priori Modellierung eines Qualitätsmaßes auf Basis von theoretischen Überlegungen scheint, wie in Heidrichs Arbeit gezeigt, aufgrund fehlender theoretischer Arbeiten zum universitären Experimentieren nicht passgenau möglich zu sein. Aufgrund dessen muss in diesem Projekt für die Systematisierung der Facetten der Dimension *Qualitätsausprägung* eine post-hoc Modellierung auf Basis von Performanzbeschreibungen realisiert werden. Für die Systematisierung der Beschreibungen der Facetten kann z. B. auf das Qualitätsmaß des *a priori* Modellierungsansatz über schwierigkeitserzeugende Merkmale in Aufgabenstellungen zurückgegriffen werden.

2.5.3. Festlegung des Assessment-Ansatzes für die experimentelle Kompetenz auf universitärem Niveau

Für die passgenaue Entwicklung eines Kompetenzstrukturmodells experimenteller Kompetenz Physikstudierender ist die Wahl des Assessment-Ansatzes von elementarer Bedeutung. Grundsätzlich ist in der Kompetenzmessung die Wahl des Messansatzes sowie die Entwicklung des Messinstrumentes abhängig von der Zielsetzung, der theoretischen Rahmung, der Modellierung und den Rahmenbedingungen (Probanden, Testzeiten etc.) bedeutsam. In dem vorliegenden Projekt müssen für die Entwicklung des Modells, auch wenn keine Kompetenzmessung stattfindet, ähnliche Fragen in Bezug auf die Erhebung der Daten gestellt werden. Auch in diesem Kapitel wird aus Ermangelung von Arbeiten für den universitären Bereich auf Evidenzen aus der schulischen Kompetenzmessung experimenteller Kompetenz zurückgegriffen.

Für die Wahl eines passgenauen Assessment-Ansatzes für die experimentelle Kompetenz auf universitärem Niveau stellt das Rahmenmodell von Miller (1990), das für die klinische Medizinausbildung entwickelt wurde, eine Orientierung dar. Das Modell systematisiert unterschiedliche Messansätze hinsichtlich ihrer Zielorientierung (siehe Abb. 6). Assessment-Formate oder Messinstrumente, die der ersten und zweiten Stufe zuzuordnen sind, stellen meist schriftliche Abfragen von deklarativen Wissensbeständen dar und adressieren dementsprechend das *Wissen 1* nach Neuweg. Unterschieden wird hierbei die reine Wissensabfrage (*knows*) und die Abfrage von kontextualisiertem, d. h. anwendungsbezogenem Wissen (*knows how*). Ausgehend von den zugrunde liegenden theoretischen Rahmungen und

Kompetenzmodellen werden Items gebildet, indem die jeweiligen Dimensionen mit ihren Facetten operationalisiert werden.

Messinstrumente, die die Stufe drei also *shows how* und Stufe vier (*does*) adressieren, können als performanznah, als performance assessment, klassifiziert werden. Unterschieden wird hier zwischen der Nähe zur Realität. Während Testinstrumente der vierten Stufe die Fähigkeiten in realen Situationen mit allen ihren Rahmenbedingungen und Einflussfaktoren adressieren, stellen Testinstrumente der dritten Stufe Simulationen unter standardisierten Bedingungen und damit eine deutliche Reduktion der Einflussfaktoren dar, wodurch aber eine höhere Standardisierung erreicht werden kann. Durch die Reduktion der Einflussfaktoren werden die Messsysteme reduziert und damit auch leichter vergleichbar. Die Instrumente der dritten und vierten Stufe entsprechen nach Neuweg der Erhebung des *Wissens 3*.

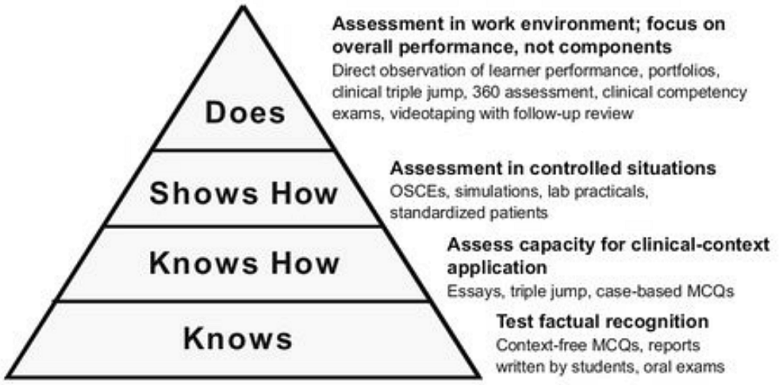


Abb. 6: Rahmenmodell zur Systematisierung unterschiedlicher Assessment-Ansätze (Nach G. E. Miller 1990 in Überarbeitung von Albino u. a. 2008).

Bezogen auf die Messung experimenteller Kompetenz von Schüler:innen[36] dominieren schriftliche Testformate, die den ersten beiden Stufen zuzuordnen sind. Messinstrumente dieser Art adressieren abhängig vom zugrunde liegenden Kompetenzmodell unterschiedliche Wissensbestände zu Konstrukten, wie *wissenschaftliches Denken* oder *Natur of Science* (siehe Kap. 2.5.2.1). Diese sind den ersten beiden Stufen nach Miller zuzuordnen. Sie sind dementsprechend eher wissens- als performanzfokussiert. Kognitive Kompetenzfacetten, wie die Planung oder die Auswertung von Experimenten, können allerdings auch mit schriftlichen Testformaten performanznah erhoben werden. Testinstrumente, die auch performative Anteile (Gut u. a. 2014, Schreiber 2009, Meier 2016) besitzen, operationalisieren auch die Facetten Aufbauen und Durchführen. Diese Instrumente sind der Stufe 3, dem *shows how*, zuzuordnen.

[36] Ausführliche kritische Auseinandersetzung mit den Vor- und Nachteilen der unterschiedlichen Messinstrumente siehe Schreiber 2009, S. 51-62 und Emden 2011, S. 39-44.

Schriftliche Instrumente für die Erhebung der experimentellen Kompetenz von Schüler:innen besitzen eine hohe Objektivität, stehen jedoch in der Kritik, dass sie nur die Wiedergabe von Wissen testen und somit der Zugriff auf die kompetenzkonstruierenden Elemente nicht gewährleistet ist (u. a. Emden 2011, Schreiber 2009). Der Einsatz performanznaher Instrumente wird aufgrund der Nähe zum Kompetenzkonstrukt nach Weinert sowie einer höheren Validität favorisiert. Hier ist allerdings einschränkend zu sagen, dass zwar die Performanz, also das Können, erhoben werden kann, dies jedoch noch keinen Rückschluss auf die zugrunde liegenden kognitiven Dispositionen erlaubt (u. a. Vogelsang 2014, Neuweg 2011, Vorholzer und C. v. Aufschnaiter 2020). Daten, die mit Hilfe von schriftlichen Testinstrumenten erhoben werden, zeigen in der Regel nur geringe Zusammenhänge zu performativ erhobenen Daten (u. a. Schecker, K. Neumann u. a. 2016, Neuweg 2011, Schreiber 2009, Shavelson, Baxter und Gao 1993). Dies ist auf die noch fehlenden Modelle zu den Wirkmechanismen hinsichtlich der Entwicklung von Kompetenzen und hier im Besonderen darauf, welche Wissensstrukturen wie handlungsauslösend bzw. -steuernd wirken, zurückzuführen (Neuweg 2015). Es ist dementsprechend aktuell noch nicht klar, wie Items gestaltet werden müssen, um diese Wissensressourcen (*Wissen 2* nach Neuweg) valide zu messen. Dies wird auch dadurch deutlich, dass sich normative und deskriptive Kompetenzmodelle in ihrer Struktur unterscheiden (Schecker und Parchmann 2006, Heidrich 2017).

Performance Assessments sind jedoch aufgrund der Zeitintensivität und der hohen Material- und Personalkosten vor allem im Large-Scale-Assessment kaum ökonomisch einsetzbar. Weiterhin sind Performance Assessments häufig nicht ausreichend reliabel (Gut-Glanzmann und Mayer 2018, Schreiber 2009, Emden 2011). Es liegen starke Varianzen der individuellen Performanz zwischen unterschiedlichen Aufgaben und Testzeitpunkten vor (Gut-Glanzmann und Mayer 2018).

> "Die fachmethodische Schülerleistung ist offenbar nicht stabil sondern beeinflusst von z. B. der Aufgabenstellung (Shavelson et al. 1993, 1999; Ruiz-Primo und Shavelson 1996), dem erforderlichen aufgabenspezifischen Fachwissen (Gott und Duggan 2002), der Komplexität (Gut 2012, p. 211; Gott und Duggan 2002), dem Testverfahren (Shavelson et al. 1999) und dem Messzeitpunkt (Cronbach et al. 1997; Shavelson et al. 1999)." (Schreiber, Theyßen und Schecker 2014, S. 163).

Einen Mittelweg zwischen schriftlichen und experimentellen Instrumenten stellt der Einsatz von Simulationen von Experimenten dar. Simulationen ermöglichen Interaktivität sowie Rückkopplung durch das der Simulation zugrunde liegende Modell (Schreiber, Theyßen und Schecker 2014). Sie sind ökonomischer einsetzbar als Realexperimente und die Auswertungsmethode ist valide und reliabel (Schreiber 2009). Schreiber kommt in seinen Analysen, die sich mit der Substituierbarkeit von schriftlichen Tests durch Simulationen beschäftigt, zu dem Schluss, "[...], dass

ein Test mit einem Simulationsbaukasten im Gegensatz zum schriftlichen Test das Potenzial hat, den Test mit einem Realexperiment auf Populationsebene zu substituieren." (Schreiber, Theyßen und Schecker 2014, S. 171). Baxter und Shavelson haben neben Wissenstests, Simulationen und Realexperimenten auch noch Laborjournale mit in die Analyse zur Substituierbarkeit einbezogen. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass Laborjournale und Simulationen die besten Ansätze für die Substitution des direkten Beobachtens beim Experimentieren darstellen (Baxter und Shavelson 1994).

Testinstrumente, die die Stufe vier (*does*) nach Miller adressieren, würden den Lehrer:innen die Diagnose der experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten von Schüler:innen in Experimentiersituationen (formatives Assessment) ermöglichen (Theyßen, Schecker, Gut u. a. 2014, Etkina, van Heuvelen u. a. 2006). Es hat verschiedene Ansätze gegeben, solche Instrumente (Beobachtungsbögen) zu entwickeln (Meier 2016, Maiseyenka 2014, Ralle und Di Fuccia 2014, Etkina, van Heuvelen u. a. 2006, Muth 2018). Auch diese Instrumente unterliegen der Problematik, dass es noch an empirisch geprüften Wirkmodellen und Kompetenzentwicklungsmodellen bzw. Modellierungen von Lernprozessen ("learning progressions") fehlt (u. a. Gut-Glanzmann und Mayer 2018, Schecker und Parchmann 2006, Vorholzer und C. v. Aufschnaiter 2020). Die Instrumente müssen weiterhin zunächst bei einer großen Anzahl an Proband:innen eingesetzt werden, um so eine Normierungsstichprobe aufzubauen. Nur so wäre eine passgenaue Diagnose individueller Leistungen möglich.

Unabhängig vom eingesetzten Testinstrument beschränkt sich die Erhebung experimenteller Kompetenzfacetten in der Schule aufgrund der Operationalisierung der Fähigkeiten über die Kompetenzstrukturmodelle oftmals auf einen kleinen Ausschnitt von Experimentiersituationen (z. B. durch den gewählten Kontext oder die Aufgabenstellung). Es wird folglich eher selten der gesamte Experimentierprozess durchlaufen. Dies wird u. a. von Hodson (1993) kritisiert, weil dabei das Herstellen von Zusammenhängen und somit ein differenziertes experimentelles Vorgehen verhindert wird.

Insgesamt lassen sich mit Blick auf die Datenerhebung für die Entwicklung eines Kompetenzstrukturmodells experimenteller Kompetenz auf universitärem Niveau folgende Aspekte festhalten: Es liegen keine genuinen Modelle und damit verbunden passgenaue Messinstrumente für den universitären Bereich vor, auf die zurückgegriffen werden kann. Die Modellierung und Messung experimenteller Kompetenz im Hochschulbereich ist bisher nur durch die Adaption von schulischen Modellen mit Assessmentformaten der Stufe 1 und 2 erfolgt. Diese fokussieren bisher nur einzelne Aspekte des wissenschaftlichen Arbeitens, wie z. B. wissenschaftliches Denken, adressieren aber aufgrund des unterschiedlichen Bildungsanspruchs der beiden Ausbildungsbereiche nicht die Fachmethodik oder den Gesamtprozess des Experimentierens. Weiterhin ist offen, welche kognitiven

Dispositionen und damit unterschiedlichen Wissensbestände beim Experimentieren handlungsgenerierend und -steuernd wirken.

Aufgrund dieser Aspekte wird die Datengrundlage für die deskriptive Modellierung der Dimensionen *Fachmethodik* und *Qualitätsausprägung* mittels standardisierter Realexperimente (Stufe 3, *shows how*) erhoben. Die Aufgabenstellungen für die Realexperimente sollten keine einzelnen Prozessschritte, sondern jeweils in sich geschlossen einen gesamten Experimentierprozess adressieren. Zur Steigerung der Reliabilität sowie zur Anreicherung der Datengrundlage wird neben den experimentellen Handlungen auch ein Laborjournal erhoben. Dieses Vorgehen bietet eine hohe Gegenstandsnähe und damit potentiell die Möglichkeit, die handlungsgenerierenden und -steuernden kognitiven Ressourcen beim universitären Experimentieren für die Modellierung der Dimensionen zugänglich zu machen. Der Einsatz von Simulationen stellt keine Option dar, weil diese den Experimentierprozess zu sehr reduzieren und auch zu weit von der Realität des universitären Experimentierens entfernt sind.

2.5.4. Fazit

Insgesamt lässt sich auf Basis der vorangegangenen Analysen in Bezug auf die Modellierung experimenteller Kompetenz auf universitärem Niveau festhalten, dass aktuell noch keine passgenauen Modellierungen auf universitärem Niveau existieren, jedoch grundsätzliche Modellierungshinweise und -schritte aus der schulischen Kompetenzforschung abgeleitet werden können. Dazu wurden systematisch die Wahl der Kompetenzdefinition (Kap. 2.5.1), die Funktion von Kompetenzmodellen (Kap. 2.5.2.1), die Auswahl der zu modellierenden Dimensionen (Kap. 2.5.2.2), die methodische Herangehensweise bei der Modellierung von unterschiedlichen Dimensionen (Kap. 2.5.2.3 und Kap. 2.5.2.4) sowie mögliche Assessment-Ansätze zur Erhebung einer passgenauen Datengrundlage (Kap. 2.5.3) diskutiert.

Für die Modellierung der experimentellen Kompetenz Physikstudierender wird als Kompetenzdefinition auf die Weinertsche Definition (2001) in Erweiterung durch Klieme und Leutner (2006) zurückgegriffen. Es wird somit bei der Entwicklung des Modells ein Fokus auf die kognitiven Leistungsdispositionen gelegt und die affektiven Kompetenzen als beeinflussende Merkmale angesehen. Die Analyse des Zusammenhangs zwischen den Konstrukten *Kompetenz* und *Performanz* zeigte, das es aktuell noch keine validen Instrumente für den direkten Zugriff auf kognitive Handlungsressourcen existieren und diese anhand der gezeigten Performanz rekonstruiert werden können.

Aufgrund fehlender systematischer normativer Setzungen sowie noch fehlender empirischer Analysen der Struktur universitären Experimentierens kann in die-

sem Projekt nur ein deskriptives Kompetenzstrukturmodell entwickelt werden, mit dem eine Systematisierung typischer Fähigkeitsmuster von Physikstudierenden realisiert werden kann.

Die Analyse bestehender Kompetenzstrukturmodelle aus dem schulischen Bereich ergab, dass diese typischerweise aus drei Dimensionen bestehen, um die qualitative Ausprägung (Dimension *Qualitätsausprägung*) fachmethodischer Fähigkeiten und Fertigkeiten (Dimension *Fachmethodik*) mit unterschiedlichen physikalischen Inhalten (Dimension *Inhaltsbereiche*) zu verknüpfen. In Bezug auf die Modellierung der drei Dimensionen zeigte sich, dass aufgrund des unterschiedlichen Bildungsanspruchs von Schule und Universität keine vollständigen Modellierungen der experimentellen Kompetenz übernommen werden können. Es wurde jedoch auch deutlich, dass methodische Herangehensweisen und ausgewählte theoretische Rahmungen (Komplexität) für die Modellierung der Dimensionen *Fachmethodik* und *Qualitätsausprägung* aus dem Bereich Schule auch funktional für das universitäre Niveau sein können.

Die Analyse unterschiedlicher Assessment-Ansätze ergab, dass für die Erhebung der Datengrundlage für die Modellierung experimenteller Kompetenz auf universitärem Niveau für eine hohe Gegenstandsnähe standardisierte Realexperimente (Stufe 3 nach Miller), die die Bearbeitung eines vollständigen Experimentierprozesses adressieren, sowie zur Anreicherung der Daten zusätzlich Laborjournale genutzt werden sollten. Damit soll potentiell die Möglichkeit geschaffen werden die handlungsgenerierenden und -steuernden kognitiven Ressourcen universitären Experimentierens für die Modellierung der Dimensionen zugänglich zu machen.

3. Forschungsdesiderate und Entwicklungsschritte

In diesem Projekt wird als zentrale Fragestellung untersucht: Welche experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten sollen auf universitärem Niveau in Anfängerlaborpraktika von Physikstudierenden erworben werden und wie lassen diese sich im Rahmen der Kompetenzmodellierung passgenau beschreiben und systematisieren?

Die zentrale Erkenntnis der vorangegangenen theoretischen Analysen ist, dass aktuell ein hochschulfachdidaktischer Diskurs bezüglich der lehr-lerntheoretischen Fundierung der experimentellen Ausbildung von Physikstudierenden fehlt. Es kann dementsprechend nicht auf bestehende Modellierungen zurückgegriffen werden, und es ist unklar, welche experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten, in welcher Ausprägung im Rahmen des Physikstudium als Grundlage für die berufliche Tätigkeit als Physiker:in auf welche Art und Weise erworben werden müssen. Das Lehrveranstaltungsformat Laborpraktikum, das aufgrund des hohen fachpraktischen Anteils für den Erwerb experimenteller Fähigkeiten und Fertigkeiten prädestiniert ist, wird in Bezug auf die Lernwirksamkeit der bestehenden didaktischen und organisatorischen Strukturen seit Jahrzehnten kritisiert. Die traditionell tradierten experimentellen Aufgabenstellungen entsprechen nicht mehr den heutigen Bildungsansprüchen universitärer Ausbildung. Eine Überarbeitung des Veranstaltungsformates, um der Diskrepanz zwischen den Zielsetzungen und den von den Lernenden erworbenen Fähigkeiten entgegenzuwirken, ist aktuell aufgrund fehlender grundsätzlicher lehr-lerntheoretischer Fundierungen nur punktuell und kaum evidenzbasiert möglich. Die valide Modellierung experimenteller Kompetenzen auf universitärem Niveau würde durch eine didaktisch fundierte Gestaltung von Laborpraktika sowie durch die Entwicklung von formativen und summativen Assessment-Instrumenten für die Studierenden eine systematischere und damit erfolgreichere Lernprozessbegleitung bedeuten.

Der Hauptfragestellung dieses Projektes, also der Modellierung experimenteller Kompetenz Physikstudierender, wurde sich im Kapitel 2 auf zwei Ebenen genähert.

Zunächst wurde in Bezug auf den Status Quo diskutiert, was schon in Bezug auf den Erwerb experimenteller Fähigkeiten und Fertigkeiten im Rahmen des Studiums bekannt ist und welche Hinweise es in Bezug auf die inhaltliche Ausprägung und der Struktur experimenteller Fähigkeiten und Fertigkeiten gibt. Dabei ist deutlich geworden, dass für die deutsche universitäre Ausbildung auf normativer Ebene nur grobe Zielsetzungen von der Konferenz der Fachbereiche Physik festgelegt wurden, d. h. die konkrete Ausgestaltung der Lehr-Lernumgebung ob-

liegt u. a. auch aufgrund der Lehrfreiheit den Laborpraktikumsleiter:innen.[37] Weiterhin existieren bisher noch keine Systematisierungsansätze für die experimentelle Kompetenz auf universitärem Niveau. Durch die vergleichende Analyse des Experimentierens in der Forschung, im Studium und in der Schule konnten Charakteristika abgeleitet werden, die für die Modellierung experimenteller Kompetenz auf struktureller Ebene genutzt werden können. Dazu gehören mögliche kognitive Prozesse beim Experimentieren (unterschiedliche Formen des Schließens), Hinweise zu komplexitätsbestimmenden Merkmalen des Experimentierprozesses (iterativer Prozess zwischen physikalischem Wissen, experimentellen Handlungen und den Geräten), didaktische Merkmale der typischen Gestaltung von Laborpraktika sowie Hinweise zur Lernwirksamkeit (inhaltliche Orientierung und experimentelle Aufgabenstellungen). Weiterhin wurde deutlich, dass für den schulischen Bereich diverse normative Vorgaben sowie theoretische und evidenzbasierte Modellierungen der experimentellen Kompetenz von Schüler:innen existieren.

Im zweiten Schritt wurde deswegen auf Ebene des Diskurses zur schulischen Kompetenzmodellierung analysiert, ob Modellierungen der experimentellen Kompetenz aus der Schule (adaptiert) übernommen werden können (Kap. 2.5). Es wurde dabei deutlich, dass aufgrund des unterschiedlichen Bildungsanspruchs von Schule und Universität keine Modellierungen der experimentellen Kompetenz aus der Schule übernommen werden können. Stattdessen sind die Ansätze zur Modellierung experimenteller Kompetenz aus der Schule auf methodischer Ebene dahingehend analysiert worden, wie Kompetenzmodelle auf schulischem Niveau entwickelt wurden, welche charakteristischen Bestandteile diese Kompetenzmodelle aufweisen und welche theoretischen Rahmungen genutzt werden (Kap. 2.5.2). Ergebnis der Analyse ist, dass die Voraussetzung für die Entwicklung eines Kompetenzmodells, welches die Lernanforderungen in einem spezifischen Kontext systematisiert, ist, dass systematische Beschreibungen der domänenspezifischen Fähigkeiten und Fertigkeiten sowie der Fachkontexte vorliegen. Mit Bezug auf das Veranstaltungsformat Laborpraktikum kann festgestellt werden, dass es kein einheitliches Curriculum, keine differenzierten Zielsetzungen und keine Strukturierungen der experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten gibt. Die Wahl fiel dementsprechend auf die Entwicklung eines deskriptiven Kompetenzstrukturmodells auf Basis der Beschreibung typischer Handlungsmuster. Aufgrund dessen, dass nicht klar ist, welche Handlungsressourcen das experimentelle Können ausmachen oder welche zusätzlichen Faktoren, wie z. B. Erfahrung oder Kreativität, die Expertiseentwicklung in welchem Maß unterstützen, fokussiert das Modell die experimentelle Performanz von Physikstudierenden und nicht die kognitiven Dispositionen (Kap. 2.5.1). Dies bedeutet für den Assessment-Ansatz,

[37] Die Analyse von Zielsetzungen für Laborpraktika in den USA (2.3.2) zeigte, dass die Anforderungskataloge differenzierter als in Deutschland sind, jedoch zu vielfältig und wenig handlungsnah beschrieben sind, als dass sie funktional für die Gestaltung von Lernumgebungen oder Assessments wären.

dass die Datengrundlage für die Entwicklung des Kompetenzstrukturmodells sehr performanznah, jedoch auch so standardisiert, dass die Daten vergleichbar sind, erhoben werden muss (Kap. 2.5.3). Weiterhin ist deutlich geworden, dass schulische Kompetenzstrukturmodelle für die experimentelle Kompetenz meist drei Dimensionen aufweisen: Eine inhaltliche Dimension, die die physikalischen Inhaltsbereiche strukturiert, eine Dimension Fachmethodik, in der die Fähigkeiten und Fertigkeiten systematisiert werden und eine Dimension Qualitätsausprägung, in der qualitative Abstufungen systematisiert werden (Kap. 2.5.2.2).

Aus der Analyse zur schulischen Kompetenzmodellierung (Kap. 2.5.2) konnten für die Entwicklung eines performanzorientierten Kompetenzstrukturmodells für die experimentelle Kompetenz Physikstudierender die notwendigen methodischen Schritte abgeleitet werden, die im Folgenden als Entwicklungsschritte strukturiert werden.

Die erste zu entwickelnde Dimension ist die der *Inhaltsbereiche*, weil sie die Voraussetzung für die Konstruktion der experimentellen Aufgabenstellungen für die Erhebung der performanznahen Datengrundlage darstellt. Im schulischen Bereich ist diese Dimension normativ gesetzt (Kap. 2.5.2.3). Aufgrund der fehlenden normativen Vorgaben für den universitären Bereich werden die Komponenten der Dimension auf Basis einer Analyse von Standardliteratur und Experimentieranleitungen diverser deutscher Universitäten entwickelt.

> **Entwicklungsschritt 1:**
> Welche physikalischen und technischen Inhaltsbereiche sollen im Rahmen von Anfängerlaborpraktika erworben werden?

Die Dimensionen *Fachmethodik* und *Qualitätsausprägung* sollen Beschreibungen von typischen Handlungsmustern sowie deren qualitative Ausprägung umfassen. Bei der schulischen Kompetenzmodellierung wird an dieser Stelle je nach Zielsetzung des Modells eine passgenaue theoretische Rahmung in Bezug auf das Experimentieren verwendet und empirisch geprüft (Kap. 2.5.2.3). Die vorangegangenen Analysen zeigten, dass aufgrund des unterschiedlichen Bildungsanspruchs von Schule und Universität hier keine Anleihen aus dem schulischen Bereich gemacht werden können, weil diese meist nur einen Ausschnitt des Kompetenzbereichs Erkenntnisgewinnung umfassen und somit der Komplexität des universitären Experimentierens nicht gerecht werden. Die Beschreibungen der Facetten der Dimension *Fachmethodik* sowie deren Systematisierung wird deswegen in diesem Projekt auf Basis der Analyse der Performanz (typische Handlungsmuster) unterschiedlich fähiger Proband:innen entwickelt. Für erste Rückschlüsse auf die der Performanz zugrunde liegenden kognitiven Dispositionen sollen z. B. in Anlehnung an das Prozessmodell zum abduktiven Schließen (Kap. 2.1.2) beobachtbare strukturierende Merkmale identifiziert werden.

Entwicklungsschritt 2:
Welche Prozessmerkmale und kognitiven Prozesse strukturieren das Experimentieren auf universitärem Niveau?

Für die Entwicklung der Dimension *Qualitätsausprägung* werden im schulischen Bereich unterschiedliche Modellierungsansätze verwendet (Kap. 2.5.2.4), die entweder auf Basis der Aufgabenkomplexität oder auf Basis der Testscores gebildet werden. Beide Ansätze können im Rahmen dieses Projektes nicht realisiert werden. Stattdessen werden die Qualitätsunterschiede durch eine post-hoc Modellierung auf Basis der herausgearbeiteten typischen Handlungsmuster unterschiedlich fähiger Experimentierender im Sinne eines Experten-Novizen-Vergleichs identifiziert und modelliert.

Entwicklungsschritt 3:
Welche qualitativen Unterschiede können in der Ausprägung der experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten auf universitärem Niveau identifiziert, strukturiert und beschreibbar gemacht werden?

Der so entwickelte Vorschlag für ein performanzorientiertes Kompetenzstrukturmodell für die experimentelle Kompetenz Physikstudierender soll zur Überprüfung der Güte und Geltung noch ins Feld (Praktikumsleiter:innen und Fachphysiker:innen) zurückgebunden werden.

Entwicklungsschritt 4:
Wie hoch ist die Passung des Kompetenzstrukturmodells in Bezug auf die Erwartungen von Praktikumsleiter:innen und Fachphysiker:innen bezüglich der zu erwerbenden experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten im universitären Bereich?

4. Design der empirischen Studie

Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines validen performanzorientierten Kompetenzstrukturmodells für die experimentelle Kompetenz Physikstudierender. Insbesondere soll das Modell es ermöglichen, experimentelle Handlungen hinsichtlich ihrer Ausprägung (Qualität) einzuschätzen. Dazu muss das Modell die „Übersetzung“zwischen den gezeigten Handlungen und der Tiefenstruktur der Performanz, d. h. den zugrunde liegenden Dispositionen bzw. kognitiven Strukturen, vor dem Hintergrund des Gesamtprozesses leisten. Im Folgenden werden die methodischen Schritte auf dem Weg zur Entwicklung eines Kompetenzstrukturmodells (Kap. 4.1) sowie die qualitative Absicherung dieser Schritte (Kap. 4.2) dargestellt.

4.1. Untersuchungsdesign

Der Vorschlag für ein deskriptives dreidimensionales Kompetenzstrukturmodell wird in einem mehrschrittigen qualitativen Verfahren entwickelt (siehe Abb. 7).

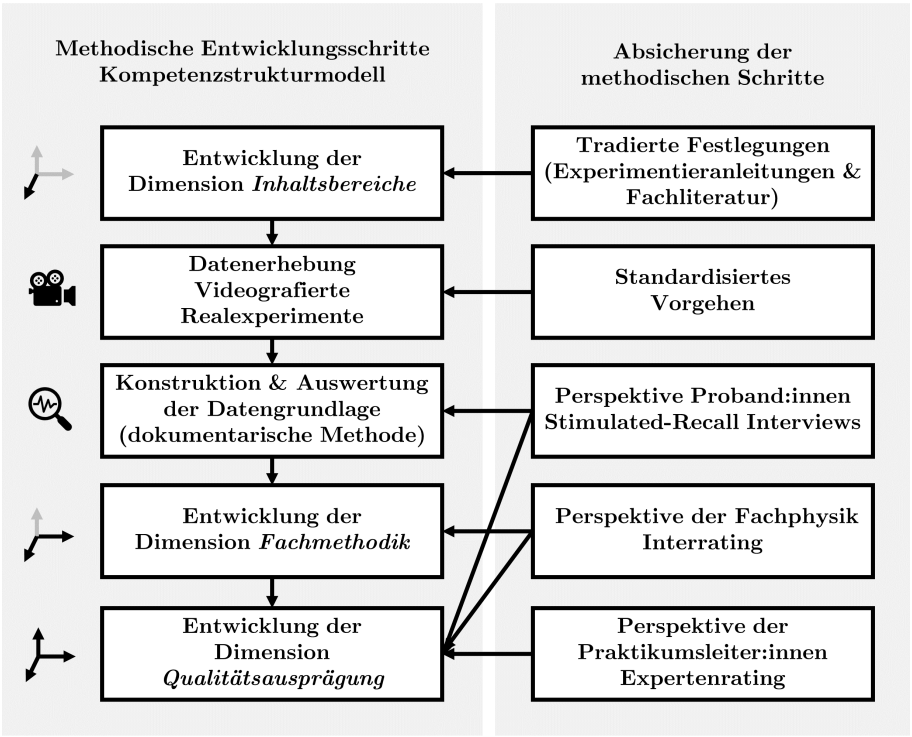


Abb. 7: Darstellung der grundsätzlichen Anlage der Studie für die Entwicklung und Prüfung eines Kompetenzstrukturmodells für die experimentelle Performanz (Physik-)Studierender.

In einem ersten Schritt wird die Dimension *Inhaltsbereiche* entwickelt (Kap. 5). Für Laborpraktika existieren keine normativen Vorgaben für die im Anfängerpraktikum zu behandelnden physikalischen Inhalte. Vielmehr werden die Experimente und deren Inhalte seit Jahrzehnten in Form von Experimentieranleitungen oder in Form von Literatur zum Physikalischen Praktikum tradiert. Die Facetten der Dimension *Inhaltsbereiche* werden daher für eine möglichst hohe Passung für alle Anfängerlaborpraktika in Deutschland hinsichtlich der jeweiligen Kernelemente, die sowohl in allen Experimentieranleitungen als auch in der Literatur zu finden sind, analysiert und systematisiert.

Auf Basis dieser entwickelten Dimension werden zwei unterschiedlich komplexe Experimentieraufgaben für Realexperimente gestaltet (Kap. 6). Durch einen Vergleich der gezeigten Handlungsmuster bei der Lösung der beiden unterschiedlich komplexen Experimentieraufgaben untereinander sowie mit den Ergebnissen anderer Forschungsprojekte sollen erste vorsichtige Aussagen zur Generalisierbarkeit des Kompetenzstrukturmodells bzgl. anderer physikalischer Inhaltsbereiche abgeleitet werden. Die Datenerhebung erfolgt mittels videografierter, standardisierter Realexperimente. Um für die Entwicklung des Kompetenzstrukturmodells eine möglichst hohe Varianz in den experimentellen Handlungen zu erreichen, werden diese von unterschiedlich fähigen Proband:innen durchgeführt. Neben den videografierten Realexperimenten werden zur Charakterisierung der Stichprobe personenbezogene Daten mit einem Fragebogen erhoben.

Die videografierten Handlungen der Proband:innen werden zunächst in *chronologischen Fallstudien* verschriftlicht (Kap. 6). Die Passung der Verschriftlichungen wird, da hierbei ein hoher interpretativer Anteil gegeben ist, mit Hilfe von *Stimulated Recall Interviews* mit der Perspektive der Proband:innen abgeglichen und die Datenbasis je Fallstudie angereichert. Die so erstellten Fallstudien werden mit der *dokumentarischen Methode* (Kap. 7) analysiert (siehe Abb. 13). Mit Hilfe dieses qualitativen Ansatzes sollen auf Basis zweier Interpretationsschritte sowie eines hohen komparativen Anteils bei der *Typenbildung* (sinngenetisch und relational) die Rekonstruktion handlungsleitender Wissensbestände der Performanz und damit verbunden ein Rückschluss auf die der Performanz zugrunde liegenden kognitiven Dispositionen erfolgen.

Die Dimension *Fachmethodik* (Kap. 9.2) wird mittels der *formulierenden Interpretation*, dem erste Schritt der *dokumentarischen Methode*, entwickelt. Dazu werden die einzelnen Fälle hinsichtlich der Strukturelemente der experimentellen Performanz (fachmethodische Elemente) im Sinne eines Experten-Novizen-Vergleichs vergleichend analysiert. Die dadurch gewonnenen Facetten und Subfacetten werden durch den Vergleich unterschiedlich fähiger Proband:innen ausgeschärft und trennscharf formuliert.

Mit Hilfe des zweiten Analyseschrittes der *dokumentarischen Methode*, der *reflek-*

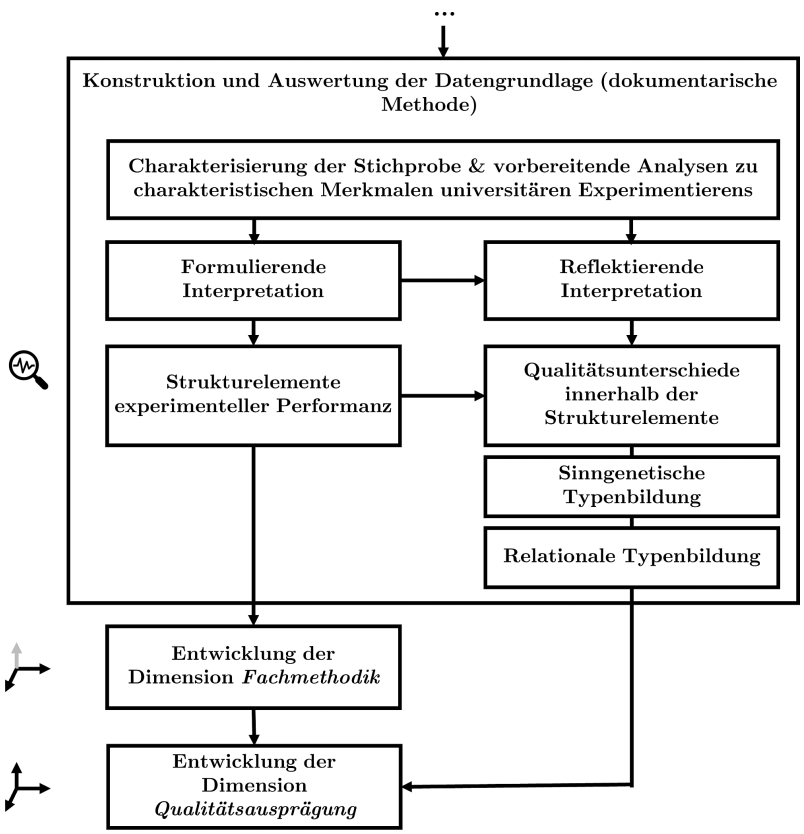


Abb. 8: Schematische Darstellung der zwei Interpretationsschritte der *dokumentarischen Methode* für die Entwicklung des performanzorientierten Kompetenzstrukturmodells für Physikstudierender (Auszug aus Abb. 7)

tierenden Interpretation, werden innerhalb der einzelnen Strukturelemente der experimentellen Performanz Qualitätsunterschiede zwischen den Proband:innen sowie deren kennzeichnenden performativen Merkmale (Typiken) herausgearbeitet und als Facetten der Dimension *Qualitätsausprägung* systematisiert (Kap. 9.3.3.2).

Sowohl die Dimensionen *Fachmethodik* als auch *Qualitätsausprägung* werden mittels eines Interratings mit einem Fachphysiker abgesichert (Kap. 10.1). Ziel ist die Überprüfung der Passung der Facetten mit den Anforderungen an das Experimentieren auf universitärem Niveau. Die Passung der Facetten der Dimension *Qualitätsausprägung* werden weiterhin mit der Perspektive der Praktikumsleiter:innen und Betreuer:innen im Rahmen eines Expertenratings hinsichtlich der Passung zum universitären Experimentieren im Rahmen von Anfängerlaborpraktika überprüft (Kap. 10.2).

Der so entwickelte Vorschlag für ein performanzorientiertes Kompetenzstrukturmodell für die experimentelle Kompetenz Physikstudierender soll durch die qualitative Analyse der Fälle in allen Facetten mit deskriptiven Indikatoren un-

terlegt und multiperspektivisch hinsichtlich der Angemessenheit abgesichert werden.

4.2. Gütekriterien qualitativer Forschungsansätze

Die Entwicklung eines performanzorientierten Kompetenzstrukturmodells experimenteller Kompetenz erfolgt in diesem Projekt mit Hilfe des Ansatzes der qualitativ - rekonstruktiven Sozialforschung (Bohnsack, Geimer und Meuser 2018). Diesem Ansatz ist eine eigene Erkenntnislogik immanent, die sich aufgrund der Berücksichtigung der *Komplexität des Untersuchungsgegenstandes*, der *Unterschiedlichkeit der Perspektiven* unterschiedlicher Akteur:innen sowie einer hohen *subjektiven Reflexivität* des Forschenden und des Forschungsprozesses auszeichnet (Flick, Kardorff und Keupp 1995). Auf Basis der spezifischen Erkenntnislogik (Flick, Kardorff und Keupp 1995) dieses Ansatzes soll die *Komplexität* des universitären Experimentierens fassbar und damit die Rekonstruktion der für diesen Prozess notwendigen multiplen experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten auf der Tiefenebene des Prozesses mittels *dokumentarischer Methode* zugänglich gemacht werden. Für die Rekonstruktion der einzelnen Fähigkeiten und Fertigkeiten sowie das Herausarbeiten von Aspekten, die eine qualitative Stufung der Fähigkeiten und Fertigkeiten ermöglichen sollen, werden die gezeigte Performanz diverser unterschiedlich fähiger Proband:innen während des Experimentierens (*unterschiedliche Perspektiven*), und damit ihr spezifischer Umgang mit der Situation erhoben. Der subjektiven Reflexivität wird dieses Projekt durch die kontinuierliche Qualitätsüberprüfung des Forschungsprozesses hinsichtlich der Wissenschaftlichkeit, Güte und Geltung mittels unterschiedlicher Gütekriterien gerecht.

Im Diskurs zur Bewertung qualitativer Forschungsansätze haben sich drei Grundpositionen[38] herausgebildet (Steinke 1999). Die Vertreter:innen der ersten Grundposition wollen die klassischen quantitativen testtheoretischen Gütekriterien Objektivität, Validität und Reliabilität durch Umformulierungen und Operationalisierungen auch für qualitative Forschungsansätze nutzbar machen. Die zweite Grundposition umfasst Forscher:innen, die Qualitätskriterien für qualitative Forschung ablehnen, da keine Möglichkeit besteht einen geeigneten vergleichbaren Referenzrahmen, der den Kriterien zugrunde liegen würde, zu finden. Die dritte Position stellt einen Mittelweg zwischen den beiden anderen Positionen dar: Die Forscher:innen lehnen die klassischen, testtheoretischen Gütekriterien ab und wollen stattdessen spezifische Qualitätskriterien für qualitative Forschungsansätze entwickeln. Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass der Diskurs nach wie vor aktuell ist und es noch kein von allen Seiten akzeptiertes Standardverfahren

[38] In dieser Arbeit werden die Grundpositionen nur verkürzt dargestellt und nicht diskutiert. Für einen umfassenden Einblick in den Diskurs siehe Steinke 1999, Flick 2019.

hinsichtlich der Prüfung der Gütekriterien für qualitative Forschungsansätze gibt (u. a. Flick 2019, Steinke 1999, Kuckartz 2012, Kane 2013).

Grundsätzlich geht es bei der Sicherstellung von Standards im Bereich der Forschung vor allem darum, das verwendete Design sowie die erhaltenen Daten und Schlussfolgerungen hinsichtlich ihrer Plausibilität zu analysieren, um deren Gültigkeit in Bezug auf die Fragestellung zu überprüfen sowie, um die Überprüfung der Gültigkeit und Limitationen der Studie. Ein solcher Ansatz, der mittlerweile vielfach sowohl in qualitativen als auch in quantitativen Forschungsprojekten Anwendung gefunden hat, ist der *argumented-based validity* Ansatz nach Kane (2013). Grundidee ist:

> "It involves a straight-forward two-step process; the development of a clear statement of the claims inherent in the proposed interpretations and uses and a critical evaluation of these claims" (Kane 2013, S. 448)

Bei dem Validierungsansatz werden im ersten Schritt die im Forschungsprozess getroffenen Entscheidungen und Schlussfolgerungen im Rahmen des gesamten Forschungs-Settings hinsichtlich der *Klarheit*, *Kohärenz* und *Vollständigkeit* sowohl empirisch als auch theoretisch fundiert analysiert . Kane 2013 schlägt in dem Zusammenhang sechs Bereiche zur Bildung von (*interpretation/use arguments*) (IUA) vor: *scoring*, *generalizations*, *extrapolation*, *theory-based inferences*, *score uses*.

Im zweiten Schritt werden alle gebildeten Argumente hinsichtlich ihrer Plausibilität (Vollständigkeit und Kohärenz) überprüft (*validity argument*). Im Besonderen geht es dabei darum Limitationen offen zu legen, alternative Erklärungsansätze zu erläutern oder fundiert zu widerlegen. Dabei gibt es kein Standardverfahren, vielmehr gilt:

> "Different kinds of inferences will require different kinds of analysis for their evaluation." (Kane 2013, S. 452)

Aufgrund des explorativen Charakters des hier vorgestellten qualitativen Projektes wird bei den Ansätzen zur Bildung der IUAs auf einen Katalog mit Gütekriterien für qualitative Studien (Steinke 1999) zurückgegriffen. Der Katalog stellt eine Mischung aus den Grundpositionen eins und drei dar: Für die Analyse und Bewertung der Wissenschaftlichkeit, Güte und Geltung qualitativer Ansätze werden die grundlegenden Aspekte der klassischen Kriterien passgenau zur spezifischen Erkenntnislogik qualitativer Forschung umformuliert sowie durch weitere noch fehlende Kriterien ergänzt. Dies erscheint vor dem Hintergrund, qualitative Forschungsprojekte zum einen vergleichbar standardisiert wie quantitative Forschungsansätze hinsichtlich der Güte abzusichern und zum anderen, um der spezifischen Erkenntnislogik des Ansatzes gerecht zu werden, plausibel.

Die Bildung der jeweiligen Argumente findet in den jeweiligen Kapiteln statt. Die Evaluation der IUAs, d. h. deren Prüfung im Rahmen des zweiten Schrittes des *argument-based approach*, findet im Diskussionskapitel (Kap. 10) statt. Die nach Kane (2013) definierten Bereiche sind diesen immanent.

Das Gütekriterium der *Relevanz* der Forschungsfrage (Steinke 1999) für das Forschungsfeld ist in den theoretischen Kapiteln dargestellt worden.

Das Gütekriterium der *Intersubjektiven Nachvollziehbarkeit (a)* zielt auf die Bewertung des Forschungsprozesses ab. Anders als beim testtheoretischen Kriterium der Objektivität, wo eine intersubjektive Vergleichbarkeit angestrebt wird, kann für die Bewertung der Qualität der Ergebnisse in qualitativen Verfahren aufgrund der geringen Standardisierung nur eine Nachvollziehbarkeit des Prozesses realisiert werden (Steinke 1999). Ziel ist sicherzustellen, dass durch die Dokumentation des Forschungsprozesses[39], die Absicherung der Daten mit Hilfe anderer Perspektiven sowie durch die Verwendung kodifizierter Verfahren die logische Schrittfolge sowie die Generierung der Ergebnisse transparent und für andere Forscher:innen zugänglich gemacht wird. In diesem Projekt werden in den jeweiligen Kapiteln alle Untersuchungsschritte hinsichtlich ihrer Passung zur Zielsetzung, ihrer Entwicklung, der Datenerhebung sowie Auswertung explizit diskutiert und zur Bildung von IUAs genutzt. Weiterhin wird die Entwicklung des Modells durch weitere Perspektiven der Akteur:innen (Praktikumsleiter:innen, Praktikumsbetreuer:innen sowie Fachphysiker:innen), die in Zukunft das Modell für die Lehrveranstaltung Laborpraktikum nutzen können, abgesichert. Schlussendlich wird durch die Nutzung der dokumentarischen Methode, die ein kodifiziertes Verfahren darstellt, das methodische Vorgehen vereinheitlicht.

Mit dem Kriterium *Indikation des Forschungsprozesses (b)* wird der Forschungsprozess hinsichtlich seiner Gegenstandsangemessenheit bezüglich des Ansatzes, der Methodenwahl und Auswertungsstrategie beurteilt (Steinke 1999). Die experimentelle Kompetenz Physikstudierender ist bisher noch nicht tiefer gehend untersucht worden. Forschungsprojekte, die sich mit der experimentellen Kompetenz von Schüler:innen beschäftigen, werden dem Niveau der universitären Ausbildung nicht gerecht, sodass die vorliegende Studie als explorativ eingestuft werden kann. Explorative Studien, vor allem diese, die ein neues Feld in seiner Komplexität erfassen und strukturieren wollen, sind prädestiniert für einen qualitativen Forschungsansatz. Der Ansatz, videografierte Realexperimente für die Entwicklung der Datengrundlage zu verwenden, ist aufgrund der großen Nähe zum späteren Einsatz des Modells im Rahmen von Laborpraktika plausibel. Die dokumentarische Methode wird der Komplexität des Untersuchungsgegenstandes

[39] Hier wird den Empfehlungen von Flick gefolgt, dass zur Herhöhung der Reliabilität einheitliche Vorgaben für die Transkription existieren, in der Auswertung wörtlich wiedergegebene Passagen in Abhebung zu Paraphrasierung durch den Forschenden markiert werden und der gesamte Prozess durch reflexive Dokumentation charakterisiert sein sollte (Flick 2005b)

durch den hohen komparativen Anteil von Beginn an sowie der Bildung von Typiken gerecht und kann als gegenstandsangemessen gewertet werden. Die Akteure, die auf unterschiedlichen Ebenen an der Entwicklung des Modells beteiligt sind, weisen alle durch eine langjährige Tätigkeit im Bereich des universitären Experimentierens sowie in Forschung und Lehre einen hohen Situationsbezug zum Untersuchungsgegenstand auf. Schlussendlich kann festgehalten werden, dass die Methodenwahl, die Erhebungs- und Auswertungsmethodik sowie die beteiligten Akteur:innen ein kohärentes Bild darstellen.

Das Kriterium *empirische Verankerung (c)* umfasst die Beurteilung, ob die Bildung und Überprüfung von Theorien in den Daten verankert ist (Steinke 1999). Die empirische Verankerung wird mit Hilfe einer systematischen Datenanalyse unter Nutzung der dokumentarischen Methode sowie einer jeweils hinreichenden Anzahl an Belegen pro gebildeter Theorie realisiert. Weiterhin werden durch den Einbezug der Perspektiven anderer Akteur;innen die gebildeten Schlussfolgerungen an die Empirie zurückgebunden. In diesem Projekt werden dazu die Fallstudien mittels Stimulated Recall Interviews mit den Proband:innen und die Dimensionen des entwickelten Kompetenzstrukturmodell mittels Interrating (Fachphysiker) und Expertenrating (Praktikumsleiter:innen, Praktikumsbetreuer:innen) überprüft.

Als viertes Qualitätskriterium bietet sich in diesem Projekt das Kriterium der *Limitationen (d)* an. Die Idee dahinter ist, dass die Grenzen des Geltungsbereiches der Erkenntnisse mit Fokus auf die Generalisierbarkeit beurteilt werden (Steinke 1999). An dieser Stelle bieten sich Fallkontrastierungen an, mit denen die Bedingungen der Gültigkeit überprüft werden können. Durch die Nutzung der dokumentarischen Methode, die von Beginn an Fallkontrastierungen für die Rekonstruktion impliziter Wissensbestände vorsieht, ist auch dieses Kriterium erfüllt. Die Limitationen der jeweils genutzten Methodiken und des finalen Modells werden in den jeweiligen Kapiteln diskutiert.

5. Entwicklung der Dimension *Inhaltsbereiche*

In diesem Kapitel wird die Entwicklung der Dimension Inhaltsbereiche für das performanzorientierte Kompetenzstrukturmodell zur experimentellen Kompetenz Physikstudierender vorgestellt (Kap. 5.1) sowie deren Angemessenheit und Passung diskutiert (Kap. 5.2).

5.1. Entwicklungsschritt - Qualitative Inhaltsanalyse

Für die Lehrveranstaltung Laborpraktikum existieren in Deutschland keine einheitlichen Vorgaben für die physikalischen Inhalte, die im Rahmen der Veranstaltung behandelt werden sollen. Vielmehr ist durch die tradierte Struktur, dass die Themenschwerpunkte der Laborpraktika auf die parallel verlaufenden Vorlesungen angepasst sind, eine fachsystematische Strukturierung der Inhalte entstanden. In klassischen Bachelor Physik Studiengängen werden folgende physikalische Inhalte, im Verlauf der sechs Semester, oftmals in der angegebenen Reihenfolge, behandelt:

> "[... Die Studierenden] verfügen über fundierte Kenntnisse in der klassischen Physik (Mechanik, Elektrodynamik, Thermodynamik, Schwingungen, Wellen und Optik) und sind mit den Grundlagen der Quanten-, Atom- und Molekül-, Kern-, Elementarteilchen- und Festkörperphysik vertraut." (Empfehlung der Konferenz der Fachbereiche Physik 2010, S. 3)

Anfängerlaborpraktika finden in der Regel im Rahmen der ersten vier Semester statt. Die physikalischen Inhaltsgebiete Mechanik und Elektrodynamik werden in der Regel in allen Anfängerpraktika behandelt. Experimente zum physikalischen Inhaltsgebiet der Mechanik stellen meist sehr statische Systeme mit wenigen Freiheitsgraden in der experimentellen Realisierung (inkl. Messmethodik) dar. Weiterhin wird die Mechanik in der Schule umfangreich behandelt und im Anfängerlaborpraktikum meist sogar mit den gleichen Experimenten der Lehrmittelfirmen gearbeitet. In diesem Themenkomplex wird deswegen keine hohe Varianz in den experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten erwartet.

Für das vorliegende Projekt fiel die Entscheidung deswegen auf das physikalische Themenfeld *Elektrodynamik*. Die höheren Freiheitsgrade in der Experimentgestaltung (inkl. Messmethodik) und die weitere Entfernung zum schulischen Experimentieren haben diese Entscheidung vorrangig bedingt. Die Hoffnung ist, dass dieser Inhaltsbereich für die Entwicklung eines Kompetenzstrukturmodells mittels eines explorativen Ansatzes eine höhere Varianz in den experimentellen

Fähigkeiten und Fertigkeiten unterschiedlich fähiger Proband:innen und damit einen höheren Differenzierungsgrad der Facetten innerhalb der Dimensionen ermöglicht.

Die Entwicklung der Facetten der Dimension *Inhaltsbereiche* erfolgt für eine möglichst hohe Passung der Dimension zur Lehre in Laborpraktika mittels einer qualitativen Inhaltsanalyse (Mayring und Frenzl 2019) von Experimentieranleitungen zehn deutscher Universitäten (Liste siehe Anhang A.1)[40] sowie zwei Standardwerke zum Physikalischen Praktikum (Schenk u. a. 2014, Geschke 2001).[41] Die Entscheidung, zwei Standardwerke mit einzubeziehen, soll sicherstellen, dass die auszugsweise Analyse möglichst repräsentativ für deutsche Laborpraktika ist. Es zeigte sich bei der Analyse, dass schon nach der Analyse von fünf Universitäten und der Standardwerke eine Sättigung eintrat. Für eine bessere Fundierung wurden die Experimentieranleitungen von insgesamt zehn Universitätsstandorten analysiert. Diese wurden per Zufallsprinzip und danach, ob die Experimentieranleitungen online verfügbar waren, ausgewählt.

Die analysierten Experimentieranleitungen sind alle dem Themenbereich Elektrodynamik zuzuordnen. Im Vorfeld wurden vier Analysekriterien, die sich aus den Zielsetzungen für Laborpraktika ergeben (siehe Kap. 2.3.1), festgelegt:

- Physikalisches Phänomen
- Messaufbauten (Bauteile, Materialien)
- Messgeräte
- Aufgabenstellungen zur Beurteilung von Messdaten

Als Facetten der Dimension *Inhaltsbereiche* werden nur die Aspekte aufgenommen, die mindestens in beiden Standardwerken und an mindestens neun der zehn Universitäten eingesetzt werden. In Tabelle 1 sind die extrahierten Aspekte dargestellt. Bezüglich des Aspektes *Aufgabenstellungen zur Beurteilung von Messdaten* lässt sich festhalten, dass dies in fast allen Experimentieranleitungen, in denen dazu Aufgabenteile eingefügt waren, über den Rückbezug zur Theorie bzw. über den Vergleich mit Literaturwerten gestaltet wurde.

[40] Es wurden auch die Experimentieranleitungen der Universität Paderborn, dem Standort der Erhebung, mit einbezogen.

[41] Die Standardwerke zum Physikalischen Praktikum werden u. a. auch von Praktikumsleiter:innen neu aufgelegt. An einigen Universitäten werden nur diese Bücher im Physikalischen Praktikum genutzt und keine zusätzlichen Experimentieranleitungen ausgegeben.

Tab. 1: Mittels qualitativer Inhaltsanalyse extrahierte Aspekte, die im Themenbereich Elektrodynamik Bestandteil im Laborpraktikum sind und die Subfacetten der Dimension *Inhaltsbereiche* darstellen.

Phänomen	(Mess-)Geräte	Materialien
Gleichstromkreise	Multimeter	Widerstände
Wechselstromkreise	Oszilloskop	Dioden, Transistoren
Elektrische Felder	Frequenzgenerator	Spulen
Magnetische Felder	Spannungsquellen	Operationsverstärker
	diverse Sensoren	Kondensatoren

Die Dimension *Inhaltsbereiche* ist in Abbildung 9 dargestellt. Die Aspekte, die in Tabelle 1 aufgelistet sind, stellen die Subfacetten der drei Facetten der Dimension *Inhaltsbereiche* dar.

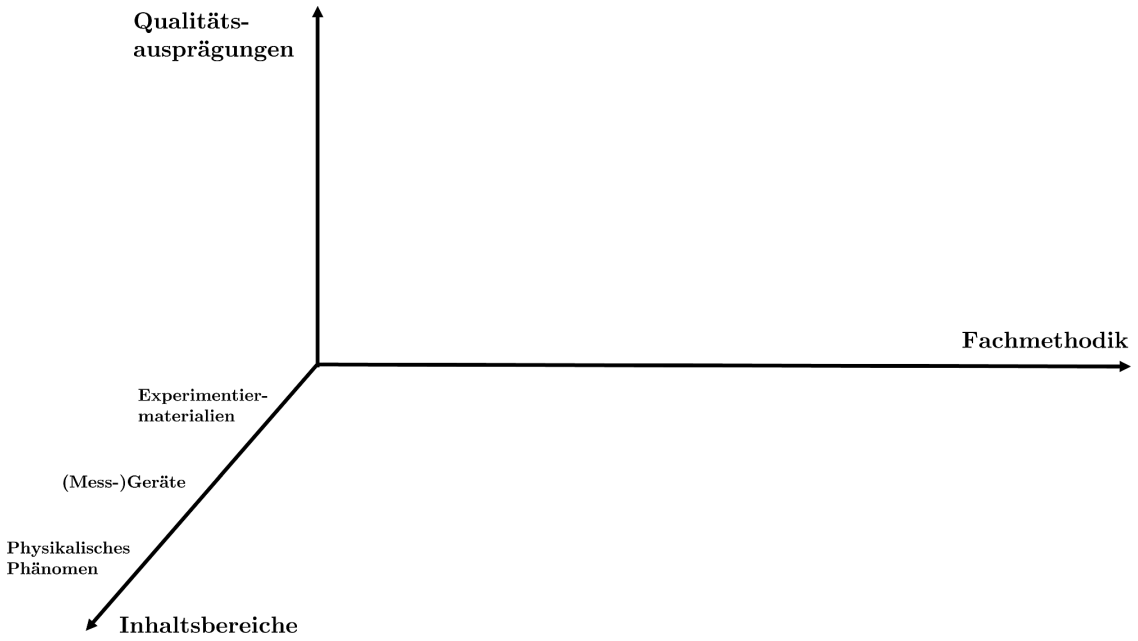


Abb. 9: In der Abbildung ist die erste entwickelte Dimension *Inhaltsbereiche* dargestellt. Die Subfacetten können in Tabelle 1 eingesehen werden.

5.2. Diskussion zur Angemessenheit der Dimension *Inhaltsbereiche*

Die Entwicklung der Dimension *Inhaltsbereiche* wurde aufgrund mangelnder normativer Vorgaben mittels eines kodifizierten Auswertungsverfahren (qualitative

Inhaltsanalyse) durchgeführt. Eine andere Methodenwahl ist nicht angezeigt, da die qualitative Inhaltsanalyse zur Systematisierung großer Datensätze prädestiniert ist und sich auch für schriftliche Dokumente eignet (Mayring und Frenzl 2019). Alle Analyseschritte und auch einbezogenen Daten sind transparent gemacht worden. Dementsprechend sind hier die Qualitätskriterien *intersubjektive Nachvollziehbarkeit (a)*, *Indikation für den Forschungsprozess (b)* sowie *Empirische Verankerung (c)* erfüllt.

Hinsichtlich des Kriteriums *Limitationen* muss festgehalten werden, dass die Experimentieranleitungen die Inhalte, die idealerweise behandelt werden sollen, enthalten. Die konkrete Betreuung der Studierenden am Experiment wird von den Lehrenden jedoch selbst gestaltet, sodass unklar ist, ob alle Aspekte überhaupt, oder, in welcher Tiefe, behandelt werden. Weiterhin sind nicht an allen Universitäten alle Experimente verpflichtend. Studierende können diese häufig hinsichtlich ihrer Neigungen wählen und somit einige der Aspekte umgehen. Für das vorliegende Projekt ist für die Entwicklung der Dimension *Inhaltsbereiche* die Analyse der intendierten Lerninhalte jedoch ausreichend, um einen inhaltlichen Rahmen für das Modell zu erstellen.

6. Konstruktion der Instrumente und Durchführung der Datenerhebung

Als Grundlage für die Modellierung der anderen beiden Dimensionen eines performanzorientierten Kompetenzstrukturmodells experimenteller Kompetenz Physikstudierender (*Fachmethodik* und *Qualitätsausprägung*) wird die Datengrundlage mittels standardisierten, videografierten Realexperimenten erhoben. Weiterhin wird für die Anreicherung der Datengrundlage ein Fragebogen für die Erhebung personenbezogener Daten eingesetzt. In diesem Kapitel werden die Konstruktion der Instrumente, d. h. der Experimentieraufgaben (Kap. 6.1) und des Fragebogens (Kap. 6.2), sowie die Erhebungssituation (Kap. 6.3) und Zusammensetzung der Stichprobe (Kap. 6.4) vorgestellt. Weiterhin wird die Angemessenheit der Datenerhebung (Kap. 6.5) mit Blick auf die Zielstellung des Projektes diskutiert.

6.1. Konstruktion der Experimentieraufgaben

Für eine möglich hohe Varianz in der Datengrundlage werden zwei unterschiedlich komplexe Experimentieraufgaben im physikalischen Inhaltsbereich *Elektrodynamik* konstruiert. In diesem Kapitel werden die inhaltliche Passung und die Gestaltungsprinzipien (Kap. 6.1.1) sowie die konkreten Experimentieraufgaben (Kap. 6.1.2, Kap. 6.1.3) vorgestellt.

6.1.1. Konstruktionsprinzipien der Experimentieraufgaben

Die Experimentieraufgaben werden für eine höhere Vergleichbarkeit der Daten standardisiert entwickelt. Dabei werden die fachmethodisch notwendigen Schritte jeweils konstant gehalten und das benötigte Fachwissen sowie die Experimentiermaterialien variiert. Für die Erhebung einer möglichst hohen Varianz in der Performanz werden die Experimentieraufgaben so gestaltet, dass die Proband:innen möglichst viele Entscheidungssituationen durchlaufen und diese mit ausreichend Freiraum bewältigen können. Dafür werden für die Konstruktion der Experimentieraufgaben die Aspekte *a) Assessmentansatz*, *b) Offenheit*, *c) Strukturierung*, *d) Operationalisierung* sowie *e) Schwierigkeitsniveau* als Stellschrauben genutzt.

Damit das performanzorientierte Kompetenzstrukturmodell experimenteller Kompetenz Physikstudierender eine möglichst hohe Passung zum physikalischen Experimentieren auf universitärem Niveau besitzt, werden die Daten für die Modellierung nach dem *a) Assessmentansatz* nach der Stufe 3 *shows how* (G. E. Miller 1990) mit Hilfe standardisierter, videografierter Realexperimente erho-

ben (Kap. 2.5.3). Durch die Standardisierung der Experimentieraufgaben kann sichergestellt werden, dass alle experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten beim universitären Experimentieren auch erhoben werden. Die Daten sind aufgrund der Minimierung der Einflussfaktoren vergleichbarer. Weiterhin stellen die gefilmten Experimentierhandlungen eine bessere Grundlage für die tiefer gehende Analyse dar, als z. B. die Beobachtung von Experimentierenden, in der die Situation nur einmal durchlaufen wird. In der Auseinandersetzung mit der Theorie des experimentellen Arbeitens an der Universität (Kap. 2.1.1) ist deutlich geworden, dass Experimentieren auf universitärem Niveau durch ein stark iteratives Vorgehen gekennzeichnet ist und alle Schritte miteinander in Beziehung stehen. Eine ausschnittsweise Betrachtung eines Experimentierprozesses würde dementsprechend die Möglichkeit nehmen, diese charakteristischen Merkmale bei der Entwicklung eines Kompetenzstrukturmodells aufzunehmen.

Die Experimentieraufgaben werden *b) offen* als *open-ended investigations* (Glaesser u. a. 2009) angelegt, d. h. die Proband:innen können bei der Bearbeitung auch scheitern. Weiterhin werden die abzuarbeitenden Schritte nicht detailliert vorgegeben. Gerade die Situationen, in denen die Proband:innen Schwierigkeiten bei der Bearbeitung haben, weil sie nicht wissen, was und warum der nächste Schritt ist oder, wenn ein unerwartetes Ergebnis erreicht wird, bieten ein hohes Potenzial für die Tiefenanalyse der der Performanz zugrunde liegenden Dispositionen und somit für die Differenzierung der experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten innerhalb des Kompetenzstrukturmodells. Zur Sicherstellung, dass die Proband:innen nicht wegen mangelndem Fachwissen an den Aufgaben scheitern, wird das Fachwissen jeweils vorgegeben, und die Proband:innen haben bei der Bearbeitung die Möglichkeit fehlendes Fachwissen im Internet zu suchen. Durchgeführte Internetrecherchen werden bei der Erstellung der chronologischen Fallstudien zusammen mit den Handlungen dokumentiert.

Die Experimentieraufgaben sind in eine zu untersuchende physikalische Fragestellung und Handlungsanweisungen *c) strukturiert*. Obwohl die Experimentieraufgaben sehr offen angelegt sein sollen, wurde entschieden, dass die Proband:innen Handlungsanweisungen auf methodischer Ebene (Metaebene) zur Verfügung gestellt bekommen. Dies nimmt zwar die Möglichkeit zu überprüfen, welche methodischen Schritte von den Proband:innen überhaupt absolviert werden. Jedoch sollen in dem Kompetenzstrukturmodell möglichst alle methodischen Schritte, die beim Experimentieren auf universitärem Niveau durchlaufen werden, aufgenommen werden. Die Proband:innen wurden darauf hingewiesen, dass sie nicht an diese Schritte gebunden sind und selbst entscheiden können, wie sie vorgehen wollen. In beiden Experimentieraufgaben werden die gleichen Handlungsanweisungen gegeben. Dieses Vorgehen bietet das größtmögliche Potenzial, um Qualitätsunterschiede bei der Ausprägung experimenteller Fähigkeiten auf Tiefenebene möglichst vollständig und differenziert zu identifizieren.

Für eine möglichst vollständige Datenerhebung wird eine Unterscheidung bei der *d) Operationalisierung* der experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten aufgrund einer vermuteten unterschiedlichen Struktur dieser (Gut u. a. 2014) bei der Entwicklung der Handlungsanweisungen vorgenommen. Neben den videografierten Daten werden auch schriftliche Daten der Proband:innen in Form von Laborjournalen erhoben. Baxter und Shavelson 1994 zeigten, dass Realexperimente beim Performance Assessment u. a. durch Laborjournale substituiert werden können. Mit diesem doppelten Erhebungsansatz soll eine möglichst vollständige Erhebung und damit eine möglichst differenzierte Kompetenzstrukturmodellierung gewährleistet werden. Die Performanzaspekte, d. h. experimentelle Fähigkeiten und Fertigkeiten, die sich vor allem in Handlungen, wie z. B. dem Aufnehmen von Messwerten, zeigen, sollen durch konkrete Handlungsaufforderungen in der Aufgabe ausgelöst und videobasiert erhoben werden. Die Fähigkeiten, die vor allem kognitive Vorgänge darstellen, wie z. B. das Planen des Experimentes, werden durch eine Aufforderung zur schriftlichen Begründung (F. Sander 2000) im Laborjournal adressiert.

Das *e) Schwierigkeitsniveau* bzw. die methodischen Schwerpunkte bei der Bearbeitung der beiden Experimentieraufgaben werden über die physikalischen Inhalte und zu nutzenden Experimentiermaterialien variiert. Die Fragestellungen und Experimentiermaterialien bzw. -geräte werden basierend auf den Ergebnissen der Analyse von Experimentieranleitungen unterschiedlicher Universitäten festgelegt (siehe Kap. 6.1). Die weniger komplexe Aufgabe umfasst nur Aspekte mit einer geringeren Komplexität (Multimeter statt Oszilloskop oder Widerstand statt Operationsverstärker) und die Aufgabe wurde von den Proband:innen an der Universität Paderborn schon einmal experimentell unter Anleitung von Betreuenden bearbeitet. Die zweite Aufgabenstellung ist komplexer gestaltet, da die Proband:innen zwar schon unterschiedliche Experimente mit dem *Physikalischen Phänomen*, mit den *Experimentiermaterialien* oder der *Auswertungsmethodik* durchgeführt haben, allerdings noch keine Fragestellung, bestehend aus der Kombination aller Aspekte, untersucht haben. Weiterhin werden den Proband:innen bei beiden Experimentieraufgaben Materialien und Geräte des gleichen Typs in unterschiedlicher Ausführung zur Verfügung gestellt, um die zugrunde liegenden kognitiven Prozesse beim Experimentieren erhebbar zu machen. Die Proband:innen können dadurch die Materialien und Geräte, z. B. Multimeter, hinsichtlich ihrer Passung zur Fragestellung analysieren und begründet auswählen.

Beide Experimentieraufgaben sind zur Sicherstellung der Passung zum universitären Experimentieren sowie hinsichtlich der Verständlichkeit in einem iterativen Prozess durch Diskussionen mit Fachdidaktiker:innen, Fachwissenschaftler:innen und Student:innen ausdifferenziert und im Anschluss pilotiert (Kap. 6.3) worden.

6.1.2. Experimentieraufgabe 1 - Niedrige Komplexität

Bei der Experimentieraufgabe 1 handelt es sich um die weniger komplexe Aufgabe.[42] Sowohl die einzelnen Aspekte der Aufgabe, wie der physikalische Inhalt, die Experimentiermaterialien, die Mess- und Auswertungsmethodik als auch das Zusammenspiel der Aspekte wurden von den Proband:innen bereits während ihres Anfängerpraktikums bearbeitet.

Die inhaltliche Ausrichtung sowie die Wahl der Experimentiermaterialien und -geräte erfolgte bei der Konstruktion der Experimentieraufgaben auf Basis der Ergebnisse der Analyse der Experimentieranleitungen diverser Universitäten (Kap. 5). Somit ist an dieser Stelle sichergestellt, dass die inhaltliche Ausrichtung passgenau zu den Experimentieraufgaben anderer Universitäten ist. In der Tabelle 2 sind die für die Experimentieraufgabe 1 ausgewählten Aspekte fett gesetzt.

Tab. 2: Mittels qualitativer Inhaltsanalyse aus diversen Experimentieranleitungen extrahierte Aspekte, die im Themenbereich Elektrodynamik im Laborpraktikum Bestandteil sind und für die Experimentieraufgabe 1 verwendet wurden.

Phänomen	(Mess-)Geräte	Materialien
Gleichstromkreise	**Multimeter**	**Widerstände**
Wechselstromkreise	Oszilloskop	Dioden, Transistoren
Elektrische Felder	Frequenzgenerator	Spulen
Magnetische Felder	**Spannungsquellen**	Operationsverstärker
	diverse Sensoren	Kondensatoren

Die Proband:innen sollen zur Beantwortung folgender Fragestellung ein Experiment planen und durchführen:

> Welcher Messaufbau eignet sich für eine möglichst präzise Bestimmung (fünf signifikante Stellen) zweier unterschiedlicher elektrischer Widerstände mittels der Aufnahme von Strom-Spannungskennlinien?

Als Experimentiermaterialien (siehe Tabelle 3) werden drei unterschiedliche Spannungsquellen, drei unterschiedliche Multimeter und Bananenstecker zur Verfügung gestellt. Weiterhin erhielten die Proband:innen zwei Kästchen. In den Kästchen sind jeweils drei Widerstände unterschiedlicher Bauart jedoch jeweils einer Dimensionierung enthalten. In dem einen Kästchen sind Widerstände in der

[42] Der Fachwissenstext und die Aufgabenstellung befinden sich im Anhang A.2. Als eine mögliche (Muster-)Lösung kann die Fallbeschreibung von Proband Horst im Anhang A.5 gesehen werden.

Größenordnung von 10 Ω und in dem anderen in der Größenordnung von 2 MΩ enthalten. Die Dimensionierung wird den Proband:innen nicht mitgeteilt.

Tab. 3: In der Tabelle sind die Experimentiergeräte und -materialien samt ihrer Charakteristika für die Bearbeitung der Aufgabe 1 aufgelistet.

	Geräte	**Messbereich**	**Auflösung**
Spannungsquelle	Philipps PE1514	0-20 V	<10 mV, <0,2 mA
	Peaktech 6140	0-30 V	0,1 V, 0,1 A
	Manson SSP-8160	0-42 V	0,1 V, 0,1 A
Multimeter	ABB M2007	1000 V, 10 A (a.)	0,1 mV, 0,1 μA
	Metex 3850	1000 V, 20 A (m.)	0,1 mV, 2μA
	Renkforce DT-60	200 V, 20 mA	0,1 mV, 1μA
	Art	**Leistungsgrenze**	**Toleranz**
Widerstände	Kohleschicht	0,25 W	5%
	Last	5 W	10%
	Metallschicht	0,6 W	10%

Die Proband:innen müssen aufgrund der gleichzeitigen Messung der Werte für die Stromstärke und Spannung, deren Bestimmung durch die Innenwiderstände der Multimeter beeinflusst werden, zwei messmethodisch unterschiedliche experimentelle Setups (strom- und spannungsrichtiges Messen) planen. Weiterhin müssen die Experimentiermaterialien hinsichtlich ihrer Eignung für eine möglichst präzise Bestimmung (Messbereiche und Einstellmöglichkeiten), abhängig von der jeweiligen Dimensionierung der Widerstände, analysiert und ausgewählt werden. Auf Basis der Analyse der Multimeter kann der erste Teil der Fragestellung, der eine Messung mit fünf signifikanten Stellen fordert, beantwortet werden. Bei der jeweiligen Wahl der Widerstände müssen die unterschiedlichen Bauarten sowie deren Toleranzen beachtet werden.

Für die vollständige Beantwortung der Fragestellung müssen für die beiden ausgewählten Widerstände mit beiden experimentellen Setups Strom-Spannungs-Kennlinien aufgenommen, ausgewertet und vergleichend im Rahmen ihrer Messunsicherheit hinsichtlich ihrer Präzision beurteilt werden.

6.1.3. Experimentieraufgabe 2 - Höhere Komplexität

Die Experimentieraufgabe 2 stellt die komplexere Aufgabe dar, weil sich die Proband:innen im Verlauf ihres Studiums zwar mit den einzelnen Aspekten der Aufgabe, wie dem physikalischen Inhalt, den Experimentiermaterialien, der Mess-

und Auswertungsmethodik beschäftigt haben, aber noch nicht mit dem Zusammenspiel der Aspekte konfrontiert waren.[43]

Die inhaltliche Ausrichtung sowie die Wahl der Experimentiermaterialien und -geräte erfolgte wiederum auf Basis der Ergebnisse der Analyse der Experimentieranleitungen diverser Universitäten (Kap. 5). In der Tabelle 4 sind die für die Experimentieraufgabe 2 ausgewählten Aspekte fett gesetzt.

Tab. 4: Mittels qualitativer Inhaltsanalyse aus diversen Experimentieranleitungen extrahierte Aspekte, die im Themenbereich Elektrodynamik im Laborpraktikum Bestandteil sind und für die Experimentieraufgabe 2 verwendet wurden.

Phänomen	(Mess-)Geräte	Materialien
Gleichstromkreise	**Multimeter**	**Widerstände**
Wechselstromkreise	Oszilloskop	Dioden, Transistoren
Elektrische Felder	**Frequenzgenerator**	**Spulen**
Magnetische Felder	Spannungsquellen	Operationsverstärker
	diverse Sensoren	Kondensatoren

Die Proband:innen sollen zur Beantwortung folgender Fragestellung ein Experiment planen und durchführen:

> In welchem Frequenzbereich verhält sich der induktive Widerstand einer Spule in einem Wechselstromkreis näherungsweise wie ein Ohm'scher Widerstand?

Um sicherzustellen, dass die Proband:innen nicht zu Beginn der Bearbeitung scheitern, wird als weitere Hilfestellung vorgegeben:

> Nehmen Sie für die Beantwortung der Fragestellung geeignete Spannungsabfälle an den Bauteilen auf, stellen Sie grafisch das Quadrat des Scheinwiderstands $|Z|^2$ als Funktion des Frequenzquadrates f^2 dar und bestimmen Sie mit Hilfe einer geeigneten Fit-Funktion den Scheinwiderstand und die Induktivität der unbekannten Spule mit einer Genauigkeit von 5 signifikanten Stellen.

Als Experimentiermaterialien werden ein Funktionsgenerator, eine Platine mit den Bauteilen Widerstand, unbekannter Spule (68 mH, 61 Ω) sowie den benötigten

[43] Der Fachwissenstext und die Aufgabenstellung befinden sich im Anhang A.2.Als eine mögliche Musterlösung kann die Fallbeschreibung von Probandin Lea 9.1.2.1 gesehen werden.

Kabelverbindungen (Schaltplan siehe Abb. 10), drei unterschiedliche Multimeter (siehe Tab. 3) und Bananenkabel zur Verfügung gestellt.

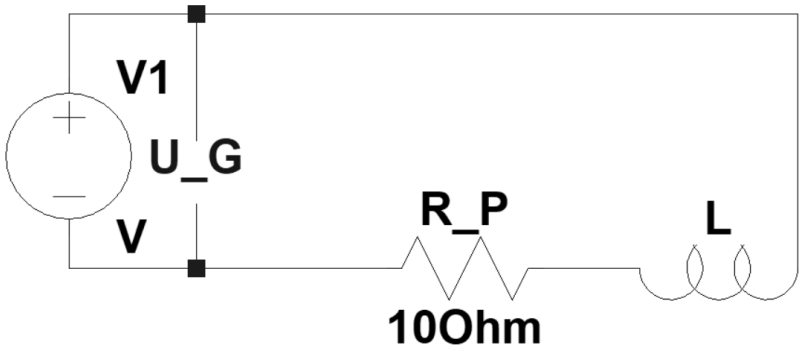


Abb. 10: Schaltplan für die Experimentieraufgabe 2

Bei der Planung des experimentellen Setups müssen die Proband:innen die Eignung der einzelnen Multimeter hinsichtlich ihrer Auflösung vor dem Hintergrund der Passung zum gefragten Frequenzbereich theoriebasiert analysieren. Auf Basis der Analyse der Multimeter kann der erste Teil der Fragestellung, der eine Messung mit fünf signifikanten Stellen fordert, beantwortet werden. Weiterhin müssen die ausgegebene Spannung (Peak-Peak V_{pp}) sowie die Signalstabilität nach Einbau aller Komponenten in den Stromkreis analysiert werden.

Für die vollständige Beantwortung der Fragestellung muss der Signalverlauf besonders im 0-30 Hz Bereich sowie grob im weiteren Verlauf aufgenommen, ausgewertet und mit Messreihen, die mit unterschiedlichen Ausgangsspannungen aufgenommen werden, verglichen und hinsichtlich ihrer Passung zueinander sowie zu theoretischen Überlegungen beurteilt werden.

6.2. Fragebogenkonstruktion

In diesem Projekt werden für die Charakterisierung der Stichprobe personenbezogene Daten mit Hilfe eines Fragebogens[44] erhoben. Ziel war, diesen möglichst kurz zu halten, um die Erhebungssituation nicht unnötig zu strecken sowie mit Hilfe möglichst offener Fragen die Personencharakteristika, wie Interesse und Vorstellungen zum Experimentieren oder zum Lehr-Lernformat Laborpraktikum, zu erheben.

Der Fragebogen besteht aus Fragen zur Studiensituation (Fachsemester, Abiturnote, Noten bestandener Lehrveranstaltungen), zum Stellenwert des Experimentierens in der Ausbildung sowie aus Fragen zur Selbstbeurteilung der eigenen

[44]Der Fragebogen kann bei der Autorin angefragt werden.

Fähigkeiten bezüglich der in den Aufgaben 1 und 2 adressierten Aspekte (Phänomen, Messgeräte, Materialien) im Inhaltsbereich Elektrodynamik.

6.3. Erhebungssituation - Videografierte Realexperimente

Die Datenerhebung erfolgt mit Hilfe videografierter Realexperimente, der Mitschriften der Proband:innen (Laborjournal) sowie des Fragebogens zu den personenbezogenen Daten an einem Tag. Den Proband:innen wurden keine Zeitvorgaben gemacht. Sie selbst konnten entscheiden, wann sie die Experimentieraufgabe beenden möchten. Dies war bei allen Proband:innen innerhalb von rund vier Stunden der Fall. Die Zuordnung der Proband:innen zu den Experimentieraufgaben erfolgte nach dem Zufallsprinzip.

Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit erhielten alle Proband:innen die gleiche Einführung: Ziel des Projektes, Ziel der Datenerhebung, Anonymisierung der Daten, Ablauf usw.

Die Erhebung begann mit dem Lesen des Fachwissenstexts. Die Proband:innen hatten dann die Gelegenheit, Fragen zu stellen. Im Anschluss gingen sie zu dem Experimentierplatz, an dem die Experimentiermaterialien, ein Laptop für Recherchen im Internet und für das Auswerten der Messdaten sowie das Film-Equipment aufgebaut waren.

Die Proband:innen sind aus zwei Perspektiven gefilmt worden, von oben, damit alle Experimentierhandlungen sowie das Notieren im Laborjournal im Bild sind, sowie von der Seite ausgerichtet auf den Laptop, um die Recherchen und Auswertungsschritte rekonstruieren zu können (siehe Abb. 11). Es wurde darauf geachtet, dass das Gesicht der Proband:innen nicht mit gefilmt wurde, um den Proband:innen die Erhebungssituation zu erleichtern. Weiterhin wurde den Proband:innen vorher die Kamerabilder gezeigt. Dies sollte ihnen verdeutlichen, dass nur ihre Hände auf dem Video zu sehen sind und welche Bereiche möglichst nicht verdeckt werden sollten.

Die Proband:innen konnten während des Experimentierens Fragen stellen. Diese sowie die Antworten der Testleitung wurden mittels Mikrofons mitgeschnitten. Das Experiment konnten die Proband:innen selbstständig für beendet erklären. Die Testleitung war während der gesamten Erhebung für Fragen sowie für die Einhaltung der Sicherheit vor Ort.

Insgesamt werden pro Proband zwei Videoaufnahmen des Experimentierens, das Laborjournal, die Datei des Auswertungsprogramms (Origin) sowie der Fragebo-

gen erzeugt.[45]

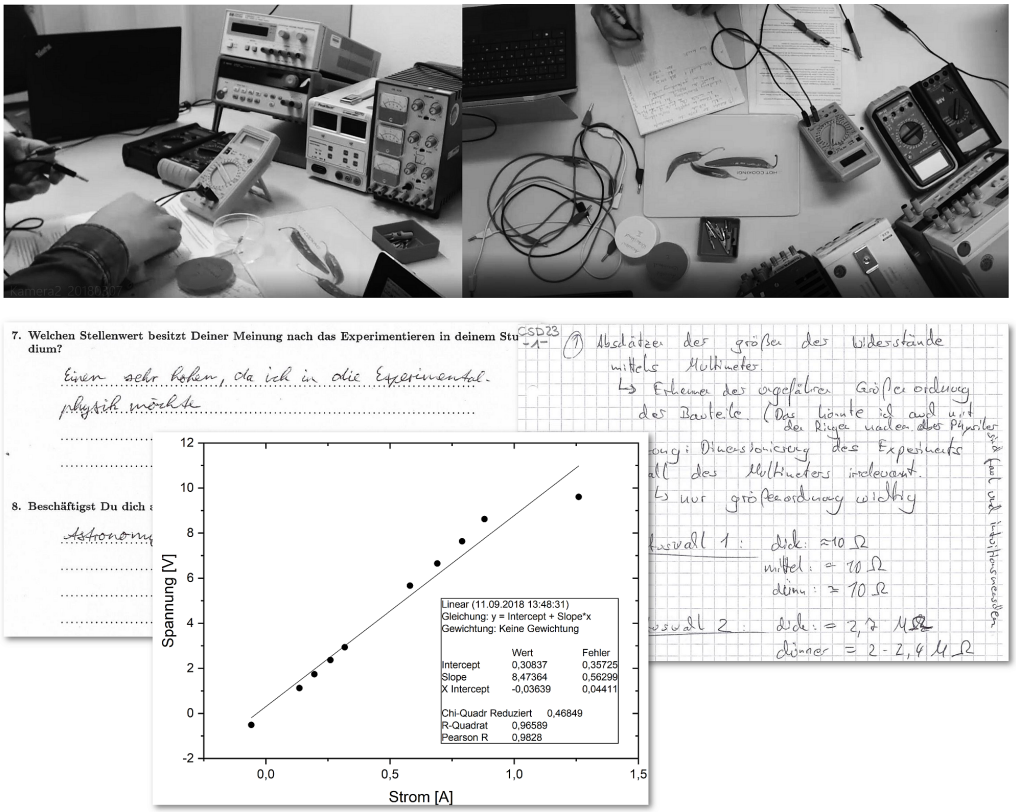


Abb. 11: Pro Proband wurden zwei Videos mit unterschiedlichen Kameraeinstellungen, ein Fragebogen, ein Laborjournal und eine Auswertungsdatei (Origin) erhoben

Die Erhebungssituation und hier im Besonderen die Experimentieraufgaben sowie die technische Realisierung wurde vor der Datenerhebung mit drei Proband:innen unterschiedlichen Fähigkeitsniveaus (zweites, viertes und sechstes Semester) pilotiert. Ziel war, die Überprüfung der inhaltlichen Gestaltung und Formulierung der Aufgabenstellungen sowie, ob die technische Realisierung und damit verbunden die Videodateien passgenau für die qualitative Analyse sind.

In der Pilotierung ist weiterhin erprobt worden, ob die Methode des *Lauten Denkens*[46] weitere Hinweise zu den kognitiven Prozessen der Proband:innen beim Experimentieren liefern würde. Es hat sich gezeigt, dass alle drei Proband:innen während der Bearbeitung stark kognitiv belastet waren. Dies zeigte sich sowohl darin, dass sie immer wieder an das *Laute Denken* erinnert werden mussten, was

[45] Im Anhang A.3 sind beispielhaft für zwei Proband:innen die erhobenen Materialien (ohne die Transkripte der Stimulated-Recall Interviews) dargestellt.

[46] Überblicksdarstellungen zu der Methodik siehe Ericsson und H. A. Simon 1999.

sie während der Bearbeitung der Experimentieraufgabe gestört hat, als auch darin, dass sie trotz vorherigen Trainings lediglich die Oberflächenstruktur, d. h., was sie gerade tun verbalisieren konnten. Da die Oberflächenstruktur sehr gut anhand der Videoaufnahmen rekonstruiert werden konnte und die Proband:innen die in der Aufgabenstellung geforderten Begründungen ihres Vorgehens schriftlich erbrachten, wurde für die Haupterhebung auf die Methode des *Lauten Denkens* verzichtet. Die Überprüfung der Aufgabenstellungen und die technische Realisierung verliefen problemlos, sodass keine Anpassungen stattfanden.

6.4. Stichprobe

Für die Entwicklung eines performanzorientierten Kompetenzstrukturmodells experimenteller Kompetenz Physikstudierender erfolgte die Zusammenstellung der Stichprobe mit dem Ziel eine möglichst große Spannbreite experimenteller Fähigkeiten und Fertigkeiten abzubilden. Dementsprechend sind Proband:innen unterschiedlicher Fähigkeitsniveaus ausgewählt worden, die für eine differenziertere Auswertung der Datengrundlage im Rahmen von Experten-Novizen-Vergleichen genutzt werden.

Die Expert:innen stellten ein:e Doktorand:in zu Beginn der Promotion (erstes Jahr), ein:e Doktorand:in am Ende der Promotion (Verteidigung abgeschlossen) sowie ein:e Post-Doktorand:in mit langjähriger experimenteller Erfahrung dar.

Bei der Auswahl der studentischen Proband:innen (Noviz:innen bis Fortgeschrittene) sind weitere Überlegungen eingeflossen. Erstens müssen die Studierenden soweit in ihrem Studium fortgeschritten sein, dass sie für die Aufgabenbearbeitung über ausreichend physikalisches Wissen sowie experimentelle Fähigkeiten und Fertigkeiten verfügen. Zweitens müssen die Studierenden so weit fortgeschritten sein, dass sie in der Lage sind alleine, d. h. ohne Betreuende oder Kommiliton:innen, experimentieren zu können. Typischerweise arbeiten die Studierenden im Laborpraktikum in Zweierteams zusammen und werden bei Bedarf von Betreuenden unterstützt. Der Schritt zum alleinigen Bearbeiten einer Experimentieraufgabe ist dementsprechend herausfordernd, sodass Erst- und Zweitsemester-Studierende nicht ausgewählt werden konnten. Die Wahl fiel dementsprechend auf Studierende, die sich zu Beginn ihres vierten Fachsemesters befinden. Sie haben zu diesem Zeitpunkt alle drei Grundlagenpraktika erfolgreich bewältigt. Die eine Hälfte der Proband:innen (n=6) hat ein klassisches Laborpraktikum mit tradierten Experimenten und engmaschigen Experimentieraufgaben absolviert und die andere Hälfte (n=6) hat das kompetenzorientierte Paderborner Physik Praktikum 3P, in dem der Erwerb fachmethodischer Fähigkeiten und Fertigkeiten systematisch

angelegt ist, durchlaufen (Kap. 2.3.2).[47] Die Wahl von zwei Studierendengruppen mit unterschiedlicher experimenteller Ausbildung soll die Varianz in der zu analysierenden experimentellen Performanz erhöhen.

Die Akquise der Proband:innen erfolgte bei den Experten auf freiwilliger Basis durch Ansprache der Jahrgangskohorte. Die Studierenden, die das klassische Praktikumskonzept durchlaufen haben, erhielten für die Teilnahme Einzelleistungen im Laborpraktikum des vierten Semesters erlassen. Die Proband:innen, die das Paderborner Physik Praktikum 3P durchliefen, haben sich aufgrund von Probandengeldern freiwillig für eine Teilnahme gemeldet.

Bei den studentischen Proband:innen, die sich zum Zeitpunkt der Erhebung im vierten Fachsemester befinden, stellt sich die Frage, ob es sich um eine Positivauswahl handelt. Die Abiturnote der Proband:innen liegt durchschnittlich bei $1,5 \pm 0,4$. Eine Studie von Sorge, Petersen und K. Neumann 2016 zeigte, dass bei 158 Befragten im ersten Semester die Abiturnote im Studienfach Physik bei $2,23 \pm 0,6$ liegt. Hier muss zum einen angemerkt werden, dass die Zahl aufgrund der geringen Befragtenquote nicht repräsentativ für deutsche Abiturient:innen ist, die ein Physikstudium beginnen. Die Abiturnote stellt den besten Prädiktor für den Studienerfolg dar (Sorge, Petersen und K. Neumann 2016, Trapmann u. a. 2007). Es ist bei den Zahlen jedoch nicht klar, wie viele der Befragten in den Semestern nach der Befragung das Studium erfolgreich bewältigt haben. Eine explorative Studie von Albrecht und Nordmeier 2011 zeigten, dass Studierende, die das Studium abbrechen eine durchschnittliche Abiturnote von $2,40 \pm 0,74$ aufweisen. Studierende, die ihr Studium fortgesetzt haben, verfügten über eine durchschnittliche Abiturnote von $1,86 \pm 0.6$. Auch diese Zahlen sind nur über eine kleine Stichprobe ermittelt worden und unterliegen somit den gleichen Einschränkungen. Für den Studiengang Physik Bachelor an der Universität Paderborn sowie von acht weiteren deutschen Universitäten hat Woitkowski im Rahmen der Erhebung des Fachwissens in den ersten zwei Semestern des Studienganges auch die Abiturnote erfasst (Woitkowski 2020). Die durchschnittliche Abiturnote liegt für Fachphysik Studierenden über alle Kohorten zu Beginn des Studiums bei $2,1 \pm 0,6$. An Testzeitpunkt 3 am Ende des zweiten Semesters, d. h. an einem Zeitpunkt, wo typischerweise nur noch die Studierenden teilnehmen, die ihr Studium auch erfolgreich beenden, liegt die Abiturnote bei $1,9 \pm 0,6$. Der Vergleich der durchschnittlichen Abiturnote in diesem Projekt zeigt, dass bei den erhobenen Proband:innen die Durchschnittsnote leicht besser, jedoch noch innerhalb der Standardabweichung, liegt. Es liegt nach Analyse der personenbezogenen Daten folglich keine Positivauswahl vor.

Die Mittelwerte der Noten, die die studentischen Proband:innen in den Experimentalvorlesungen A ($m = 2,4 \pm 1,3$), B ($m = 2,1 \pm 0,9$) und C ($3,3 \pm 0,9$) erreichten,

[47] Auf eine ausführliche Darstellung des Konzepts vom Paderborner Physik Praktikum 3P muss hier verzichtet werden. Dieses kann bei Sacher und Bauer 2021 nachgelesen werden.

liegen im mittleren Bereich. Auf die Frage, wie gerne die Proband:innen experimentieren, gaben drei Proband:innen an, dass sie *sehr gerne*, acht Proband:innen *gerne* und zwei Proband:innen *ungern* experimentieren. Ein ähnliches Bild zeigt sich in der Freitextfrage, welchen Stellenwert das Experimentieren für sie einnimmt. Neben Angaben dazu, dass das Erlernen des Experimentierens für die spätere berufliche Tätigkeit wichtig ist (n=5), wurde auch angeführt, dass das Experimentieren für das (vertiefte) Erlernen des Vorlesungsstoffes relevant ist (n=4) und, dass das Experimentieren im Curriculum einen zu hohen Stellenwert besitzt (n=4).

Ein Großteil der studentischen Proband:innen beschäftigt sich auch in der Freizeit mit physikalischen Inhalten durch das Lesen von Fachzeitschriften (n=4), das Lesen populärwissenschaftlicher Literatur (n=2) sowie das Ansehen von YouTube-Videos (n=2) oder dem eigenständigen Recherchieren von Fachinhalten, die im Studium nicht behandelt werden (n=2) bzw. dem *Basteln mit Elektronik* (n=1). Zwei Proband:innen geben an, dass sie sich in ihrer Freizeit nicht weiter mit physikalischen Themen beschäftigen. Auf die Frage, wie sicher sie sich im Inhaltsfeld Elektrodynamik fühlen, gab ein:e Proband:in *sehr sicher*, zehn Proband:innen *sicher* und zwei Proband:innen *unsicher* an.

6.5. Diskussion zur Angemessenheit der Datenerhebung

Die Entwicklung eines performanzorientierten Kompetenzstrukturmodells experimenteller Kompetenz Physikstudierender basierend auf dem Assessmentformat Performanzerhebung mittels standardisierter Experimentieraufgaben (*shows how*, G. E. Miller 1990) stellt den besten Kompromiss zwischen Nähe zum späteren Einsatz (Experimentieren im Laborpraktikum) und einer möglichst standardisierten und damit vergleichbaren Datenerhebung sowie anschließender Modellierung dar. Die Experimentieraufgaben sind passgenau zu den typischen Lerninhalten im Anfängerlaborpraktikum an deutschen Universitäten (Qualitative Inhaltsanalyse Kap. 5) gestaltet worden.

Bei der standardisierten Konstruktion der beiden unterschiedlich komplexen Experimentieraufgaben sind fünf Konstruktionsprinzipen angewendet worden. Dies ermöglichte es, dass die Aufgaben so zu gestalten, dass die den Proband:innen viele Freiheitsgrade bei der Erarbeitung ermöglicht, aber dennoch so strukturiert sind, dass sichergestellt werden kann, dass die Proband:innen nicht größtenteils bei der Bearbeitung scheitern. Die Experimentieraufgaben sind mit Fachdidaktiker:innen (Perspektive Modellierung experimenteller Performanz), Fachwissenschaftler:innen (Perspektive Praktikumsleiter:innen) und Studierenden (Perspektive Proband:innen) diskutiert und weiterentwickelt worden. Es liegt folglich eine hohe Passung zwischen den Perspektiven der unterschiedlichen Akteur:innen und

dem Vorgehen vor.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass alle Schritte der Instrumentenkonstruktion sowie der Stichprobenwahl mit allen Entscheidungssituationen transparent gemacht wurden (*a) intersubjektive Nachvollziehbarkeit*) und auf eine hohe Gegenstandsangemessenheit Wert gelegt wurde (*b) Indikation des Forschungsprozesses*). Die empirische Verankerung der unterschiedlichen Entscheidungen bezüglich der Datenerhebung ist durch den Einbezug diverser Perspektiven geschehen (*c) empirische Verankerung*).

Mit Blick auf *d) Limitationen* müssen drei Aspekte der Datenerhebung diskutiert werden.

Erstens stellt sich die Frage nach der Anzahl der konstruierten Experimentieraufgaben. Qualitative Studien sind aus ökonomischen Gründen deutlich in ihrer Fallzahl begrenzt. Mehr Experimentieraufgaben würden dementsprechend auch mehr Proband:innen benötigen. Bei den zwei konstruierten Experimentieraufgaben konnte jede Aufgabe von ausreichend vielen Proband:innen bearbeitet werden, sodass mittels des Vergleichs der Proband:innen die experimentellen Prozessmerkmale und Charakteristika angemessen rekonstruiert werden konnten. Eine geringere Probandenzahl hätte die kontrastiven Vergleiche deutlich eingeschränkt. Mehr Proband:innen wären auf arbeitsökonomischer Ebene nicht möglich gewesen. Perspektivisch müsste überprüft werden, ob das Kompetenzstrukturmodell auch für die anderen inhaltlichen Aspekte der Elektrodynamik passgenau ist.

Der Fokus der Datenerhebung liegt zweitens vor allem auf der Erzeugung einer möglichst hohen Varianz in den experimentellen Handlungen unterschiedlich fähiger Proband:innen, damit eine möglichst differenzierte Entwicklung eines Kompetenzstrukturmodells getätigt werden kann. Hinsichtlich der Experimentieraufgaben muss angemerkt werden, dass diese nur einen kleinen Ausschnitt der inhaltlichen Aspekte im Inhaltsbereich Elektrodynamik abdecken. In diesem Projekt wird der Hypothese gefolgt, dass experimentelle Fähigkeiten und Fertigkeiten auf der methodischen Ebene in allen physikalischen Inhaltsbereichen (wahrscheinlich mit unterschiedlicher Akzentuierung der einzelnen Fähigkeiten) angewendet werden. Dies müsste allerdings noch überprüft werden.

Drittens stellt sich die Frage danach, ob das entwickelte Kompetenzstrukturmodell auch für Erhebungssituationen der Stufe 4 *does* nach G. E. Miller 1990, also z. B. die Beobachtung von Studierenden während des Anfängerlaborpraktikums oder in Performance Assessments zum Zwecke der Messung der experimentellen Performanz oder der Diagnose der experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten, passgenau ist. Hier müsste vor allem überprüft werden, ob es Rahmenbedingungen gibt, die einen steuernden Einfluss auf die Struktur oder die qualitative

Ausprägung der experimentellen Kompetenz auf universitärem Niveau besitzen.

Insgesamt kann trotz dieser Limitationen festgehalten werden, dass anhand der von unterschiedlich fähigen Proband:innen gezeigten Handlungsmustern beim Experimentieren grundlegende Merkmale und Charakteristika zum universitären Experimentieren abgeleitet werden können, die vermutlich auch beim Experimentieren in anderen physikalischen Inhaltsbereichen strukturierend wirken.

7. Konstruktion der Datengrundlage

Die für das Kompetenzstrukturmodell noch zu entwickelnden Dimensionen *Fachmethodik* und *Qualitätsausprägung* werden für eine möglichst hohe Passung zum universitären Experimentieren auf Grundlage der gesammelten Daten der Proband:innen entwickelt. Dazu werden in einem ersten Schritt aus den gesammelten Daten *chronologische Fallstudien* als Datengrundlage für die Analyse erstellt (Kap. 7.1). Die einzelnen Fallstudien werden mit Hilfe von *Stimulated Recall Interviews* angereichert, um die für die Konstruktion der Fallstudien notwendigen Interpretationen hinsichtlich der gezeigten Handlungen abzusichern, inferente Stellen aufzulösen und schlussendlich, um die Handlungen hinsichtlich der Passung zur Perspektive der Proband:innen zu überprüfen und ggf. noch anzureichern (Kap. 7.2). Abschließend wird die Passung der Datengrundlage in Bezug auf die Fragestellung dieses Projektes diskutiert (Kap. 7.3).

7.1. Konstruktion der chronologischen Fallstudien

Als Datengrundlage für die Entwicklung eines Kompetenzstrukturmodells sind 14 der 16 Fälle in *chronologische Fallstudien* überführt worden. Die beiden übrigen Fälle werden nicht für die Entwicklung, sondern für die Überprüfung des Modells mit den Anforderungen von Fachphysiker:innen an das universitäre Experimentieren im Rahmen eines Interratings (Kap. 10.1) genutzt.

Für die Entwicklung der letzten zwei Dimensionen des Kompetenzstrukturmodells werden alle gesammelten Daten in *chronologische Fallstudien* überführt. Ziel ist, die Auswertung der Fälle sowohl auf Oberflächenebene (gezeigte Performanz) als auch auf Tiefenebene (Dispositionen) zu ermöglichen. Das universitäre Experimentieren zeichnet sich vor allem durch einen stark iterativen Prozess zwischen dem physikalischen Inhalt, den experimentellen Handlungen und den Experimentiermaterialien aus (Kap. 2.1). Damit dieser Multidimensionalität Rechnung getragen werden kann, ist es notwendig, dass die einzelnen Handlungsschritte beim Experimentieren vor dem Hintergrund des Gesamtprozesses analysiert werden können.

Eine kategoriale Auswertung der Daten, z. B. mit Hilfe der *Qualitativen Inhaltsanalyse*, kommt an dieser Stelle aufgrund der noch fehlenden Strukturelemente und Charakteristika universitären Experimentierens nicht in Frage. Insbesondere kann die Iterativität des Prozesses bzw. der beim Experimentieren getroffenen Einzelentscheidungen vor dem Hintergrund des Gesamtprozesses nicht angemessen abgebildet werden. Die Entwicklung eines fundiertes Kategoriensystems, bei dem in den einzelnen Kategorien auch jeweils ein Bezug zum Gesamtprozess enthalten

ist, und somit eine kategorienbasierte Videoanalyse erlauben würde, war folglich nicht möglich. Stattdessen wird die Analyse auf Basis der *chronologischen Fallstudien* mit Hilfe des qualitativ-rekonstruktiven Ansatzes der *dokumentarischen Methode* realisiert, die diesen Anforderungen gerecht wird.

Für die *chronologischen Fallstudien* liegen für jeden Proband:innen zwei Videoaufnahmen des Experimentierens, die dokumentierten Internetrecherchen, das Laborjournal, die Datei des Auswertungsprogramms (Origin) sowie der Fragebogen vor. Die Erstellung der *chronologischen Fallstudien* erfolgt schrittweise (bei Unklarheiten ggf. mehrfach iterativ):

1. Chronologische Verschriftlichung der experimentellen Handlungen auf Basis der zwei Videoaufnahmen

2. Ergänzung der Verschriftlichung der Videoaufnahmen durch die handschriftlichen Laborjournal-Einträge

3. Ergänzung der Ergebnisse aus der Auswertungsdatei (Origin)

4. Markierung von unklaren Stellen bzw. interessante Entscheidungssituationen

Auf Basis des letzten Schritts werden die *Stimulated Recall Interviews* im Sinne einer kommunikativen Validierung (Flick 2005b) zur Überprüfung der Passung der *chronologischen Fallstudien* zur Perspektive der Proband:innen und zur Anreicherung der Fallstudien vorbereitet.

7.2. Anreicherung der Fallstudien mittels Stimulated Recall Interviews

Die chronologischen Fallstudien werden mittels leitfadengestützter *Stimulated Recall Interviews* angereichert und deren Passung mit Hilfe der *Perspektive der Proband:innen* überprüft. Im Folgenden werden zunächst die Methodik von *Stimulated Recall Interviews* (Kap. 7.2.1), die standardisierte Gestaltung der Leitfäden (Kap. 7.2.2), die Durchführung der Interviews (Kap. 7.2.3) sowie deren Ergebnisse (Kap. 7.2.4) dargestellt.

7.2.1. Methodik - Stimulated Recall Interviews

Stimulated Recall Interviews stellen einen spezifischen Forschungszugang sowie eine Möglichkeit zur wissenschaftlichen Erhebung qualitativer Daten dar. Grundprinzip dieses Interview-Formates ist, dass Stimuli aus zu untersuchenden Situationen in das Interview integriert werden, die der Proband vorher durchlaufen hat. Damit ist die Hoffnung verbunden, dass die Proband:innen sich besser in die erlebte Situation zurückversetzen können und dementsprechend fundiertere, d. h. tiefer gehend begründete Antworten geben können. Für die Anreicherungen der *chronologischen Fallstudien* ist es von besonderer Bedeutung, dass die Proband:innen ihre Denkprozesse bzw. Handlungsbegründungen möglichst exakt passend zu den von ihnen getätigten Handlungen explizieren können (Calderhead 1981). Dadurch soll es möglich sein, neben der Sichtebene (beobachtete Performanz) auch die implizit vorliegenden Wissensstrukturen und -bestände (Dispositionen) rekonstruierbar zu machen. Ziel ist, die beobachtete Performanz und damit verbunden die Rekonstruktion impliziter Wissensbestände der Proband:innen durch die gewonnene subjektive Perspektive der Proband:innen zu kontrastieren und auszuschärfen. Aufgrund der gleichen Zielsetzungen sowie des methodischen Zuganges eignet sich deswegen die Kombination von *Stimulated Recall Interviews* mit dem Analyseansatz der *dokumentarischen Methode* gewinnbringend für die valide Rekonstruktion impliziter Wissenstrukturen und -bestände (Messmer 2015).

Stimulated Recall Interviews können, wie auch alle anderen Interview-Formate, abhängig vom Erkenntnisziel unterschiedlich gestaltet werden. Für eine möglichst standardisierte Erhebung der Daten passgenau zu den durchgeführten Experimenten können Leitfäden eingesetzt werden. Diese ermöglichen eine Vergleichbarkeit der Daten über mehrere Fälle. Alternativ könnten narrative Interviews durchgeführt werden. Dies hätte den Vorteil, dass man überprüfen könnte, welche Aspekte von den Proband:innen als wichtiger eingeschätzt werden, weil sie bestimmte Aspekte von allein in ihrem eigenen Narrativ (unbeeinflusster Kontext) wiedergeben (Messmer 2015). Nachteilig an diesem Ansatz ist, dass ohne enge Gesprächsführung nicht sichergestellt werden kann, dass alle für die Anreicherung der Fallstudien wichtigen Aspekte besprochen werden. Die Wahl fiel dementsprechend aufgrund der Zielsetzung, ein Kompetenzstrukturmodell zu entwickeln, und, um damit die Anforderung den universitären Experimentierprozess möglichst vollständig analysieren zu können, auf den Ansatz der *leitfadengestützten Stimulated Recall Interviews*.

Bei der Gestaltung von *Stimulated Recall Interviews* müssen drei maßgebliche Limitationen der Methode berücksichtigt werden. Zum einen können Proband:innen durch das Ansehen eines Videos, in dem sie in einer Situation handeln, Unwohlsein verspüren (Calderhead 1981). Dieser Effekt wird in diesem Projekt dadurch minimiert, dass nur die Hände der Proband:innen im Bild zu sehen sind. Weiterhin

werden die Videostimuli eher in geringem Ausmaß eingesetzt. Die Laborjournale und die Auswertungsdatei spielen bei dem Interview eine größere Rolle, sodass diese Limitation wahrscheinlich nur einen geringen Einfluss besitzt.

Weiterhin sollen die *Simulated Recall Interviews* kognitive Prozesse auf der Tiefenebene zugänglich machen. Hier muss bedacht werden, dass vor allem die routinierten kognitiven Prozesse, die oftmals nicht explizierbar sind, auch in einem *Stimulated Recall Interview* nur schwer oder gar nicht zugänglich sind (Nisbett und DeCamp Wilson 1977). Da in diesem Projekt die kognitiven Prozesse nicht alleine über die Interviews erhoben werden, sondern vielmehr mit Hilfe der Interviews, die auf Basis der Performanz rekonstruierten kognitiven Prozesse abgeglichen bzw. kontrastiert werden, wird der Einfluss dieser Limitation durch die Methodenkombination minimiert.

Schlussendlich spielt auch das Phänomen von post-hoc Begründungen eine Rolle (Smith und F. D. Miller 1978). Proband:innen können durch die Fragen des Interviewenden angeregt werden Begründungen für ihr Handeln zu generieren, die in der Situation nicht handlungsleitend waren. An dieser Stelle wird bei der Entwicklung der Leitfäden darauf geachtet, dass die (Nach-)Fragen strukturell so angelegt werden, dass dieser Einfluss minimiert wird: Alle Fragenkomplexe bestehen zum einen auf allgemein formulierten Erzählanlässen zur Situation sowie aus den gleich konstruierten Nachfragen. Weiterhin werden post-hoc Begründungen beim Abgleich der Interview-Daten mit den Fallstudien identifizierbar. Solche Stellen werden nach der Identifikation von der weiteren Analyse ausgeschlossen, was vor dem Hintergrund unproblematisch ist, dass in dem Projekt keine personenscharfe Auswertung stattfindet, sondern der Fokus auf den Handlungen der Proband:innen während der methodischen Schritte liegt. Dieses Vorgehen wird ebenfalls bei Antworten der Proband:innen, die dem Einfluss der sozialen Erwünschtheit (Smith und F. D. Miller 1978) unterliegen, angewendet.

7.2.2. Gestaltung der Stimulated-Recall Leitfäden

Die standardisierten Interviewleitfäden[48] bestehen aus vier Teilen. Als standardisierte Gliederung der Leitfäden wird die methodische Gliederung (Handlungsanweisungen) der Experimentieraufgabenstellungen (Kap. 6.1) genutzt. Die Schritte werden inhaltlich pro Proband mit den bei der Fallstudie im letzten Arbeitsschritt (4.) markierten unklaren Stellen bzw. interessanten Entscheidungssituationen angereichert.

Grundsätzlich werden die Proband:innen in den Interviews zum einen aufgefordert ihre Handlungen rückwirkend zu begründen, also ihre Denkprozesse

[48] Im Anhang A.3 sind zwei beispielhafte Interviewleitfäden zu finden.

in der Handlung zu rekonstruieren, und zum anderen werden sie aufgefordert, hypothetische Handlungsalternativen zu formulieren bzw. zu beurteilen. Zusätzlich werden die Interviews für die Klärung inferenter Stellen genutzt und die Fallstudien ggf. angeglichen.

Der erste Teil des Leitfadens umfasst für die Charakterisierung der Stichprobe drei Fragen zur Einschätzung des Stellenwertes des Experimentierens im Studium. Ziel ist, heraus zu finden, welche Zielsetzungen die Proband:innen mit dem Experimentieren verbinden und für wie wichtig sie das Experimentieren bzw. die dabei erworbenen Kompetenzen für ihre zukünftige berufliche Tätigkeit einschätzen.

Der zweite Teil des Interviews umfasst Fragen zum durchgeführten Experiment, die vor allem mit Hilfe des Laborjournals und der Auswertungsdatei beantwortet werden. Die thematische Gliederung erfolgt auf Basis der Aufgabenstrukturierung für alle Proband:innen einheitlich. Die Proband:innen erhalten für diesen Teil ihre während des Experimentierens erstellten Laborjournale, um sich besser erinnern zu können. Die Fragen werden rückwärtsgerichtet in chronologischer Reihenfolge vom Ergebnis des Experimentes aus gestellt. Mit diesem Vorgehen sollen die Proband:innen beim Erinnern an die Situation unterstützt werden. Die Fragen sind so strukturiert, dass die Proband:innen zunächst ihr Vorgehen in der Situation, z. B. beim Interpretieren des Ergebnisses, erläutern und begründen sollen. Dabei werden mögliche inferente Stellen angesprochen und geklärt. Im Anschluss werden die Proband:innen aufgefordert sich alternative Handlungsoptionen für die Situation zu überlegen. Ziel dieser zweiteiligen Fragekonstruktion ist, mögliche post-hoc Begründungen zu identifizieren und zu überprüfen, welche methodischen Handlungsalternativen die Proband:innen zwar kennen, aber nicht in der Situation angewendet haben. Hier wird jeweils nachgefragt, ob es einen Grund gab, warum diese Handlungsalternative nicht durchgeführt wurde. Diese Aussagen sollen bei der Anreicherung der *chronologischen Fallstudien* genutzt werden.

Der dritte Teil des Leitfadens umfasst Fragen zu bestimmten Handlungssequenzen beim Experimentieren. Den Proband:innen werden Videoausschnitte aus den Experimentierphasen *Aufbauen und Testen* sowie *Messwertaufnahme* vorgespielt. Die Proband:innen sollen dabei erläutern, was sie warum getan haben. Weiterhin werden fallspezifische Nachfragen gestellt. Auch diese Aussagen sollen bei der Anreicherung der chronologischen Fallstudien genutzt werden.

Abschließend wird den Proband:innen der von ihnen ausgefüllte Fragebogenteil zur Selbstbeurteilung in den Themen der Elektrodynamik vorgelegt. Sie sollen sich nun noch einmal selbst einschätzen und die Selbsteinschätzung begründen. Diese Aussagen werden vorrangig zur Charakterisierung der Stichprobe verwendet.

7.2.3. Durchführung der Stimulated Recall Interviews

Die *Simulated Recall Interviews* (n = 16) sind jeweils rund zwei Wochen nach den videografierten Realexperimenten durchgeführt worden. Die Zeitspanne zwischen den beiden Erhebungen wurde möglichst kurzgehalten, damit die Proband:innen sich noch möglichst gut erinnern konnten (Messmer 2015). Eine kürzere Zeitspanne war nicht möglich, da für die individuelle Leitfadenentwicklung zunächst die *chronologischen Fallstudien* erstellt werden mussten, was aufgrund der Verschriftlichung der Handlungen einen enormen zeitlichen Aufwand bedeutete. Die Interviews sind mittels Audioaufnahme aufgezeichnet und im Anschluss transkribiert worden.

Zu Beginn der Interviews wurden den Proband:innen zunächst völlige Anonymität zugesichert und die Ziele der Interviews erläutert. Dem schloss sich eine Zeitspanne an, in der die Proband:innen ihre Laborjournale aus der Experimentierphase durchlesen konnten, um sich zu erinnern, was sie getan haben. Die Interviews dauerten je nach Gesprächsbeteiligung der Proband:innen zwischen 45 und 90 Minuten. Die Proband:innen konnten während des Interviews auf alle ihre Materialien aus der Experimentiersituation (Fachwissenstext, Laborjournal oder Auswertungsdatei) zugreifen.

Die Proband:innen waren in den Interviews entspannt und gesprächsbereit. Dies wurde vor allem dadurch erreicht, dass die Proband:innen die Interviewerin seit zwei Jahren kennen, alle Materialien nutzen konnten, die Ziele des Interviews kannten und die Erhebung nicht als Leistungssituation wahrgenommen haben. Weiterhin war hilfreich, dass die Proband:innen in den Video-Stimuli nur ihre Hände sehen konnten. Dies wirkte der Herausforderung entgegen, dass das Ansehen der eigenen Handlungen Unwohlsein auslösen kann (Calderhead 1981).

7.2.4. Ergebnisse der Stimulated Recall Interviews

Mit der Durchführung der *Stimulated Recall Interviews* sind drei Ziele verbunden: a) Die Klärung inferenter Stellen, b) die Anreicherung/Ausschärfung der chronologischen Fallstudien und c) die Überprüfung der Passung der chronologischen Fallstudien zur Perspektive der Proband:innen. Die Aussagen der Proband:innen zu hypothetischen Handlungsalternativen werden im Kap. 9.5.2 ausgewertet.

Als erstes Ergebnis kann festgehalten werden, dass die insgesamt rund 30 inferenten Stellen in den chronologischen Fallstudien der 16 Proband:innen alle aufgelöst werden konnten. Bei diesen Stellen handelte es sich vornehmlich um Situationen, in denen die Proband:innen länger nachgedacht haben und aufgrund fehlender Notizen und den Handlungen nicht ersichtlich wurde, worüber sie nachgedacht,

oder warum sie die nachfolgenden Handlungen getätigt haben. Es stellte sich heraus, dass in diesen Phasen in 21 Fällen die Proband:innen das bisher Durchdachte und Gemachte im Sinne einer Evaluation hinsichtlich der Plausibilität beurteilt haben, um sicher zu gehen, dass der nächste Prozessschritt korrekt ist. Diese Stellen sind gemessen an der Anzahl der Handlungsschritte pro Proband in einem Zeitintervall von zwei bis vier Stunden jedoch nur sehr selten aufgetreten. Weiterhin konnten in den Videos keine Indikatoren festgestellt werden, welche es ermöglichen würden, aus den gezeigten Handlungen Rückschlüsse auf die kognitiven Prozesse zu ziehen. Diese Stellen sind deswegen bei den weiteren Analysen nicht beachtet worden.

Die restlichen neun inferenten Stellen beinhalteten unterschiedliche Handlungen beim Umgang mit den Experimentiermaterialien, für die keine Notizen im Laborjournal gemacht wurden. Auf Basis der Interviewdaten wurden die entsprechenden Stellen im Video noch einmal angesehen und es konnten für alle inferenten Stellen Indikatoren gefunden werden, sodass sie damit auch beschreibbar wurden. Die Fallstudien sind dementsprechend angereichert worden, sodass diese auch bei der Entwicklung der Dimensionen *Fachmethodik* und *Qualitätsausprägung* mit einfließen können.

Insgesamt kann folglich festgehalten werden, dass die *chronologischen Fallstudien* adäquat formuliert wurden. Die jeweils getätigten Beschreibungen entsprachen, bis auf die oben diskutierten Fälle, der Perspektive der Proband:innen. Für die weitere Analyse der chronologischen Fallstudien ist folglich sichergestellt, dass diese passgenau zu den intendierten Handlungen der Proband:innen sind.

7.3. Diskussion zur Angemessenheit und Passung der Datengrundlage

Die Datengrundlage für die Entwicklung der Dimensionen *Fachmethodik* und *Qualitätsausprägung* stellen *chronologische Fallstudien* dar. Die Passung der Fallstudien mit der Perspektive der Proband:innen sind mittels *Stimulated Recall Interviews* sichergestellt worden.

Die Wahl der *chronologischen Fallstudien* als Datengrundlage ist aufgrund der Multidimensionalität und Iterativität des Prozesses sowie aufgrund der noch fehlenden Charakteristika und Strukturelemente des universitären Experimentierens als passgenau einzuschätzen. Für alternative Ansätze, wie z. B. die *Qualitative Inhaltsanalyse*, reichen die bisherigen Evidenzen zum universitären Experimentieren nicht für eine fundierte Entwicklung eines Kategoriensystems aus. Weiterhin würde eine kategoriale Analyse nicht den Einbezug der einzelnen Handlungen vor dem Hintergrund des Gesamtprozesses ermöglichen. Mit Blick auf die Entwick-

lungsschritte 2 (Identifikation Prozessmerkmale) und 3 (Identifikation qualitative Ausprägung) kann die Konstruktion der Datengrundlage dementsprechend als passgenau eingeschätzt werden.

Die Einhaltung der Gütekriterien *intersubjektive Nachvollziehbarkeit*, *Indikation des Forschungsprozesses* sowie *empirische Verankerung* ist demnach bei der Konstruktion der Datengrundlage gegeben.

Hinsichtlich der Limitationen kann festgehalten werden, dass mit Hilfe der *dokumentarischen Methode* nur die experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten rekonstruiert werden können, die auch an *handlungsorientierte Indikatoren* zurückgebunden werden können. Die Überprüfung der Passung der Fallstudien mit der Perspektive der Proband:innen zeigte hierbei eine sehr gute Übereinstimmung. Implizite Wissensressourcen, die sich zum einen nicht in Handlungen zeigen und zum anderen auch nicht im Rahmen der Interviews expliziert werden konnten, können dementsprechend bei der Entwicklung des Kompetenzstrukturmodells nicht beachtet werden. Folgt man der Aussage von Neuweg (2011), dass sich das Können im Handeln zeigt, dann ist diese Limitation für das performanzorientierte Kompetenzstrukturmodell experimenteller Kompetenz Physikstudierender nicht von Bedeutung. Dieser Aspekt erlangt jedoch Relevanz, wenn in zukünftigen Projekten auf Basis des Kompetenzstrukturmodells Diagnoseinstrumente abgeleitet werden sollen. Weiterhin muss angemerkt werden, dass durch die Verschriftlichung der Handlungen in Form von *chronologischen Fallstudien* die Reichhaltigkeit des Materials deutlich minimiert wurde, da nur größere Handlungsmuster, aber nicht jede kleine Einzelhandlung, verschriftlicht werden konnten. Für die Entwicklung eines Kompetenzstrukturmodells reicht diese Datengrundlage jedoch aus. Eine Messung individueller Fähigkeiten und Fertigkeiten ist jedoch auf Basis dieses methodischen Ansatzes nicht möglich.

8. Datenanalysemethodik - Die dokumentarische Methode

Für die Analyse der Datengrundlage bestehend aus den *chronologischen Fallstudien* wird das qualitativ-rekonstruktive Verfahren der *dokumentarischen Methode* (Abb. 7) verwendet. Auf Basis der Analyse werden die Prozessmerkmale und qualitativen Ausprägungen der experimentellen Handlungen der Proband:innen herausgearbeitet und für die Entwicklung der Dimensionen *Fachmethodik* und *Qualitätsausprägung* verwendet. In diesem Kapitel wird zunächst das qualitativ-rekonstruktive Verfahren der *dokumentarischen Methode* vorgestellt (Kap. 8.1). Dem schließt sich die Diskussion zur Angemessenheit der Analysemethode an (Kap. 8.2).

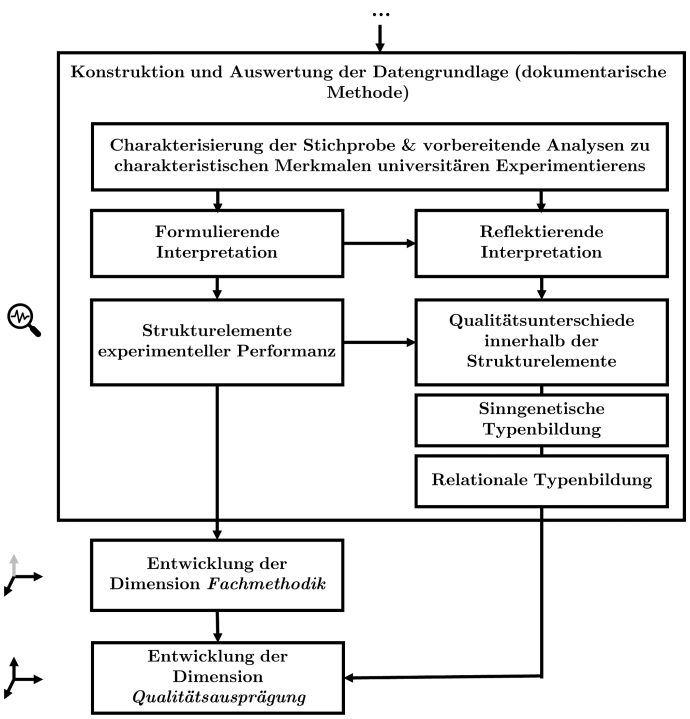


Abb. 12: Schematische Darstellung der zwei Interpretationsschritte der dokumentarischen Methode für die Entwicklung eines performanzorientierten Kompetenzstrukturmodells für die experimentelle Kompetenz Physikstudierender (Auszug aus Abb. 7)

8.1. Das qualitativ-rekonstruktive Verfahren der dokumentarischen Methode

Die methodische Wahl in diesem Projekt fiel auf die qualitativ-rekonstruktive Sozialforschung [49], da es mit Hilfe der damit verbundenen methodischen Ansätze (z. B. dokumentarische Methode, Objektive Hermeneutik, ...) möglich ist, implizit vorliegende Wissensbestände sowie deren Genese zu rekonstruieren (Bohnsack, Geimer und Meuser 2018, S. 140f) und mit Hilfe qualitativer Typenbildung erste zu überprüfende Generalisierungshypothesen abzuleiten. Die rekonstruktive Sozialforschung wird bisher vorrangig im Bereich von sprachlichen Interaktionen, wie Interviews, Gruppendiskussionen oder teilnehmender Beobachtung von Interaktionen in bestimmten Situationen, genutzt, um Überzeugungen, Wertvorstellungen und Einstellungen zugänglich zu machen (Bohnsack 1999).

Rekonstruktive Verfahren folgen der Annahme, dass die soziale Wirklichkeit sozialer Akteur:innen (Bohnsack, Geimer und Meuser 2018) und hier insbesondere die Prozesse und deren sinnhafte Strukturierung rekonstruiert werden können. Entscheidend dabei ist, dass den Akteur:innen die prozessstrukturierenden Wissensbestände nicht bewusst sind und somit nur implizit vorliegen (Lamnek 2010). Weiterhin sollen die Fälle aus ihrer Eigenlogik heraus ohne feststehende Kategorien rekonstruiert werden, um der Komplexität der zu untersuchenden Situation bzw. Handlung gerecht zu werden (Flick 2005a). Daraus folgt, dass dieser Forschungsansatz den unterschiedlichen Perspektiven der Akteur:innen gerecht wird, da sowohl die Perspektive der Beforschten bzw. des Beforschten als auch der Forscher:innen beachtet und reflektiert wird (Flick 2005a). Dies wirkt der Herausforderung, dass die Perspektive des Forschenden die Sinnrekonstruktion dominiert, mit der z. B. die q*ualitative Inhaltsanalyse* behaftet ist, entgegen, da zunächst keine feststehenden Kategorien oder theoretischen Grundannahmen in die Analyse und Interpretation einfließen sollen (Bohnsack 1999).

Als methodischer Ansatz wird in diesem Projekt die *dokumentarische Methode* (Bohnsack, Nentwig-Gesemann und Nohl 2013) verwendet. Die *dokumentarische Methodik* stellt ein sinnverstehendes, rekonstruktives und komparatives Verfahren dar. Ziel ist die Rekonstruktion impliziter Wissensbestände von Äußerungen oder Handlungen in einer Situation, die handlungsgenerierend wirken (Bohnsack 1999). Kern der Methode ist die Unterscheidung zwischen *kommunikativem* und *konjunktivem* Wissen.

Kommunikatives Wissen orientiert das Handeln in Form von *Orientierungsschemata* (Bohnsack 2012). Bei der Rekonstruktion des kommunikativen Wissens handelt

[49] In dieser Arbeit werden nur die für die Untersuchung zentralen Überlegungen und Begriffe definiert. Für einen umfassenden Überblick über die qualitativ-rekonstruktive Sozialforschung empfiehlt sich z. B. Bohnsack 1999

es sich um eine Beobachtung erster Ordnung, d. h. es wird die Frage nach dem "was" beantwortet (Bohnsack, Nentwig-Gesemann und Nohl 2013). In *Orientierungsschemata* werden folglich die Interaktionen subsumiert, die zur Kategorie "[...], was (wörtlich) gesagt wird, [...]" (Bohnsack, Nentwig-Gesemann und Nohl 2013, S. 15) gehören. Sie beinhalten das konkrete Handeln sowie Wissensbestände, wie Theoriekonstruktionen mit legitimatorischen Funktionen (Bohnsack 2012).

Das *konjunktive* Wissen umfasst implizite Wissensbestände zum modus operandi, d. h. es wird die Frage nach dem "wie" etwas getan wurde, beantwortet (Bohnsack, Nentwig-Gesemann und Nohl 2013). Das konjunktive Wissen orientiert das Handeln in sogenannten *Orientierungsrahmen*. Da es sich dabei um implizite Wissensbestände handelt, wird von einer Beobachtung zweiter Ordnung gesprochen. Die impliziten Wissensbestände sind mit Hilfe "[...] direkter Beobachtung der Performanz von Interaktionen und Gesprächen [...] zugänglich" (Bohnsack 2012, S. 126). *Orientierungsrahmen* sowie die dazu gehörigen *Orientierungsschemata* stellen *Orientierungsmuster* dar, die mit Hilfe der dokumentarischen Methode rekonstruiert werden (Bohnsack, Nentwig-Gesemann und Nohl 2013).[50]

Die gleichzeitige Analyse beider Ebenen stellt die Besonderheit der *dokumentarischen Methode* dar: In der Sozialphänomenologie zielen Analysen je nach Paradigmenabhängigkeit sozialwissenschaftlicher Handlungstheorien entweder auf Rekonstruktion der *Orientierungsschemata* oder der *Orientierungsrahmen* ab (Bohnsack 2012, S. 127). Für die Forschungspraxis mit Hilfe der *dokumentarischen Methode* bedeutet dies, dass zwei unterschiedliche Analyseschritte absolviert werden: Erstens die *formulierende Interpretation* für die Rekonstruktion der *Orientierungsschemata* und zweitens die *reflektierende Interpretation*, die den darin enthaltenen *Orientierungsrahmen* rekonstruierbar macht. Daraus folgt, dass *Orientierungsschemata* nur innerhalb der *Orientierungsrahmen*, d. h. vor dem Hintergrund des Gesamtprozesses durch die Herstellung einer Relation zum Kontext (Erfahrungsraum), handlungspraktische Relevanz besitzen (Bohnsack 2012).

Die Interpretation der *Orientierungsschemata* vor dem Hintergrund der Orientierungsrahmen hat zur Folge, dass aufgrund der unterschiedlichen Erfahrungsräume, in denen die Akteur:innen Handlungen vollziehen, die Interpretation als multidimensional (Bohnsack 1999) angesehen werden muss. Konkret bedeutet dies, dass, wenn unterschiedliche Proband:innen innerhalb der gleichen Situation interagieren, die Handlungen jeweils durch die individuellen kommunikativen bzw. konjunktiven Wissensbestände konstituiert werden und somit unterschiedliche *Orientierungsschemata* und *-rahmen* aufweisen. Dieser Multidimensionalität trägt die *dokumentarische Methode* durch komparative Analyseanteile Rechnung.

Durch gezielte Fallvergleiche können *sinngenetische Typiken* (Orientierungsmus-

[50] Hier bestehen Ähnlichkeiten zur analytischen Unterscheidung von Oser und Patry 1990, die in Bezug auf Unterrichtsplanungen zwischen Sicht- und Tiefenstruktur unterscheiden.

ter), oder bei Zusammenhängen unterschiedlicher Orientierungsrahmen zueinander können auch *relationale Typiken* (z. B. Nohl 2013), durch den Vergleich von Gemeinsamkeiten und Kontrasten zwischen den Fällen herausgearbeitet werden, sodass eine Sinnstiftung durch Vergleichshorizonte und eine Generalisierung (Bohnsack, Nentwig-Gesemann und Nohl 2013) möglich ist. Die Eindeutigkeit der Typik ist abhängig davon, inwieweit sie von anderen Typiken unterscheidbar ist (Bohnsack 1999). Anders als z. B. in der Methode der *Objektiven Hermeneutik*[51] oder der Biografieanalyse (Alber, Griese und Schiebel 2017), bei denen zunächst die Einzelfälle in ihrer Einzellogik rekonstruiert werden und dann komparativ gearbeitet wird (Fabel-Lamla und Tiefel 2003), werden bei der *dokumentarischen Methode* die Fallvergleiche von Beginn an in die Interpretation integriert. Anders als die *Grounded Theory* (Strübing 2014), bei der die Fälle aufgrund ihrer (theoretischen) Spezifikationen von Beginn an zu Theoriebildungszwecken verglichen und wenig Generalisierungspotentiale auf der Ebene der Einzelfälle fokussiert werden, wird bei der *dokumentarischen Methode* die Eigenlogik der Fälle als Fundierung der Typenbildung verwendet (Bohnsack 1999).

Die *dokumentarische Methode* wird aufgrund des Zugriffs auf implizite Wissensbestände sowie deren Genese mittlerweile vermehrt auch in der fachdidaktischen Unterrichtsforschung im Bereich des schulischen Kompetenzerwerbs angewendet (u. a. H. Sander 2017, Martens und Asbrand 2009, Bonnet 2009). Dies ist auf die Annahme zurückzuführen, dass sich, wie in Kap. 2.5 diskutiert, Kompetenz in der Performanz (Wissen 3), d. h. im Handeln in einer spezifischen Situation, zeigt (Neuweg 2011). Die der Performanz zugrundeliegenden Dispositionen (Wissen 2) sind durch Rekonstruktion der gezeigten Handlungen zugänglich (Neuweg 2011). Dies stimmt mit der Definition überein, dass die Performanz eine Sichtstruktur darstellt, während die Kompetenz auf der kognitiven Tiefenstruktur anzusiedeln ist und als generatives Prinzip verstanden werden kann (Chomsky 1973).

Diese Potentiale der dokumentarischen Methode sollen für die Entwicklung eines performanzorientierten Kompetenzstrukturmodells auf universitärem Niveau genutzt werden. Ziel ist, die handlungsleitenden Wissensstrukturen und damit zugrundeliegenden Dispositionen in den einzelnen Entscheidungssituationen beim Experimentieren zu rekonstruieren und auf Basis dessen die Entwicklung eines Kompetenzstrukturmodells auf Basis der Performanz zu ermöglichen. Hierzu kommt den Aspekten der systematischen Differenzierung zwischen unterschiedlichen Interpretationsebenen und der Einbeziehung komparativer Analysen besondere Bedeutung zu, um sich der Komplexität des universitären Experimentierens und der damit verbundenen Fähigkeiten und Fertigkeiten zu nähern.

Weiterhin bietet die Methodik einen Zugang zur Analyse der Performanz (Bohnsack, Nentwig-Gesemann und Nohl 2013) und damit verbundenen die Möglichkeit, die zugrunde liegenden Dispositionen (Bohnsack 1999, Martens und

[51] Ausführliche Darstellung der Unterschiede Bohnsack 1999, S. 97 - 105.

Asbrand 2009) durch den analytischen Zugang zum *Typischen* einer Handlung in bestimmten Situationen (Rosenberg 2012) zu rekonstruieren. Die komparativen Analyseelemente und damit verbunden die Generierung von Typiken sind hier von besonderer Bedeutung, da in diesem Projekt nicht die handlungsgenerierenden Aspekte einzelner Proband:innen herausgearbeitet werden sollen, sondern durch den Vergleich qualitativ unterschiedlicher Handlungen mehrerer Proband:innen in einer Situation *Typiken* unterschiedlicher Fähigkeitsausprägung rekonstruiert werden sollen. Die rekonstruierten *Orientierungsschemata* (Sichtebene, Performanz) und *-rahmen* (Tiefenebene, Dispositionen) werden für die Entwicklung der Dimension *Fachmethodik* und die Typiken für die qualitative Stufung in der Dimension *Qualitätsausprägung* genutzt.

8.2. Diskussion der Angemessenheit der Auswertungsmethodik

Die *dokumentarische Methode* stellt für das vorliegende explorative Forschungsprojekt eine passgenaue, kodifizierte Analysemethode dar. Durch die zwei Analyseschritte sowie durch die komparativen Elemente von Beginn der Analyse an wird die Methodik der Multidimensionalität und Iterativität des universitären Experimentierens sowie der Sequenzialität des Handelns (Nohl 2013) gerecht. Weiterhin ist durch die Rekonstruktion der Handlungsmuster, bestehend aus den fachmethodischen Einheiten (Orientierungsschemata) und deren qualitativer Ausprägung, die Analyse der Datengrundlage vor dem Hintergrund des Gesamtprozesses möglich. Die Methodik bietet dementsprechend den nötigen Freiraum, den das explorative Projekt benötigt, sowie dennoch die notwendige Strukturierung bei der Rekonstruktion der der experimentellen Performanz zugrundeliegenden kognitiven Dispositionen.

Die *dokumentarische Methode* wurde bisher vorrangig für Analysen von Interviews, Gruppendiskussionen, Beobachtungen usw. mit Fragestellungen mit Bezug zur Soziologie (Milieu-Analysen, Werthaltungen, Gruppendynamiken z. B. von Jugendlichen mit Migrationshintergrund) genutzt. Die systematische Analyse von komplexen Handlungsmustern ist bisher jedoch noch nicht erfolgt. Das vorliegende Projekt bietet die Möglichkeit zu überprüfen, ob die *chronologischen Fallstudien* als Datengrundlage für die *dokumentarische Methode* ausreichend sind und ob es überhaupt möglich ist, anhand von Handlungsbeschreibungen implizite Wissensressourcen zu rekonstruieren.

Limitierend wirkt bei der Methodik, dass qualitative Studien einen hohen interpretativen Analyseanteil aufweisen. Die komparativen Elemente der Methodik und auch die Absicherung der Erkenntnisse mit Hilfe weiterer Perspektiven von relevanten Akteur:innen (Fachphysiker:innen, Praktikumsleiter:innen) sollen die-

se interpretativen Anteile hinsichtlich ihrer Passung prüfen. Damit soll zum einen sichergestellt werden, dass die Datenanalyse nicht zu sehr von der Forscherperspektive gelenkt wird und zum anderen die Nutzbarkeit des Modells geprüft werden.

Insgesamt kann die Wahl der Analysemethodik *dokumentarische Methode* als kohärent zu den einzelnen Schritten und Bestandteilen des Projektes eingeschätzt werden.

9. Ergebnisse der empirischen Studie - Vorschlag eines Kompetenzstrukturmodells

Die zu *chronologischen Fallstudien* verdichtete Datengrundlage (vgl. Kap. 7.1) wird im Folgenden als Grundlage für die Entwicklung der Dimensionen *Fachmethodik* und *Qualitätsausprägung* eines performanzorientierten Kompetenzstrukturmodells, das experimentelle Kompetenz auf universitärem Niveau beschreibt, genutzt. Das vorgeschlagene Kompetenzstrukturmodell ist deskriptiv. Es soll ermöglichen, anhand beobachtbarer Performanz auf die zugrunde liegenden kognitiven Dispositionen zurück zu schließen.

Die Entwicklung des Kompetenzstrukturmodells erfolgt unter Nutzung der *dokumentarischen Methode*. In einem mehrstufigen Verfahren (siehe Abb. 13) werden schrittweise die charakterisierenden Merkmale universitären Experimentierens induktiv abgeleitet und innerhalb der beiden Dimensionen *Fachmethodik* und *Qualitätsausprägung* systematisiert. Die Darstellung der methodischen Schritte der Entwicklung folgt nicht exakt der Forschungslogik der *dokumentarischen Methodik*, sondern orientiert sich zu Gunsten einer erhöhten Leserfreundlichkeit an illustrierenden Beispielen.

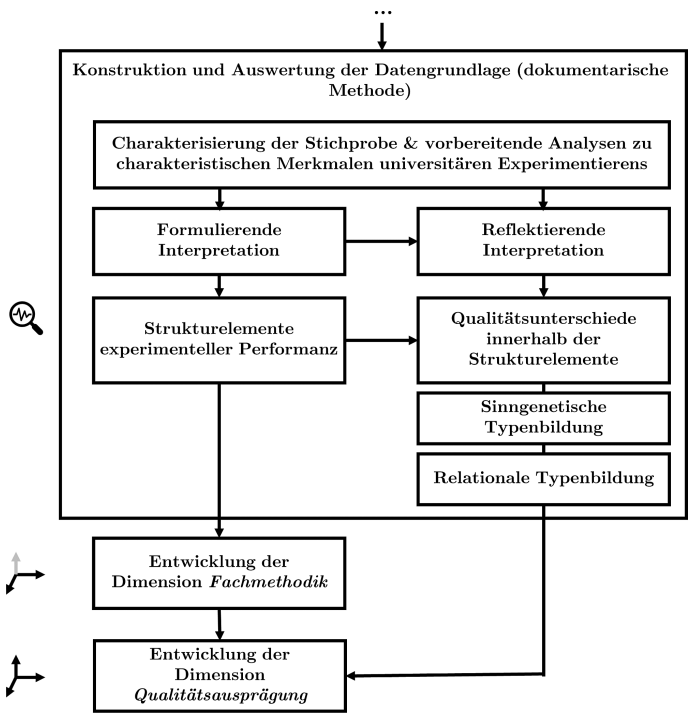


Abb. 13: In der Abbildung wird die Entwicklungslogik des Kompetenzstrukturmodells unter Nutzung der dokumentarischen Methode illustriert.

Als Einstieg wird zunächst die Stichprobe charakterisiert (Kap. 9.1) und analysiert, ob bei den weitergehenden Analysen die Bearbeitungen der beiden unterschiedlich komplexen Aufgabenstellungen ohne Einschränkungen als gemeinsame Datengrundlage genutzt werden können (Kap. 9.1.1). Dazu wird zunächst ein Überblick über alle Proband:innen (Personenbezogene Daten, Merkmale der Bearbeitung der Aufgaben, ...) gegeben und im Anschluss werden vier exemplarische Fallbeschreibungen vorgestellt (Kap. 9.1.2). Die Fallbeschreibungen werden nur zur Vorstellung der Datenlage genutzt und stellen keinen eigenständigen Auswertungsschritt dar.

Im ersten methodischen Schritt der dokumentarischen Methode, der *formulierenden Interpretation*, werden die *chronologischen Fallstudien* auf typische Strukturelemente der experimentellen Performanz auf universitärem Niveau analysiert (Kap. 9.2). Dazu werden zunächst die objektiven Sinngehalte der Sichtebene (Performanz) rekonstruiert, kontrastiv analysiert und zentrale beobachtbare methodische Handlungsmuster, die den Experimentierprozess strukturieren, herausgearbeitet. Diese typischen Handlungsmuster werden in der Dimension *Fachmethodik* systematisiert und im Anschluss an die Entwicklung der Dimension *Qualitätsausprägung* mit dieser abgeglichen und finalisiert (Kap. 9.3.3.2).

Die Dimension *Qualitätsausprägung* wird im methodischen Schritt einer *reflektierenden Interpretation* und durch den qualitativen Ansatz der Typenbildung entwickelt (Kap. 9.3). Dazu werden die *Orientierungsrahmen* der Handlungsmuster rekonstruiert, d. h. es wird rekonstruiert, welche inneren Logiken den Handlungsmustern zugrunde liegen und ob diese zu verschiedenen Typiken gebündelt werden können. Für diesen Schritt werden zunächst im Rahmen vorbereitender Analysen der *chronologischen Fallstudien* anhand von Experten-Novizen-Vergleichen grundsätzliche charakterisierende Merkmale universitären Experimentierens abgeleitet (Kap. 9.3.1). Dazu werden insbesondere die Prozessmuster der Proband:innen bei der Bearbeitung (Kap. 9.3.1.1), die Bewältigung herausfordernder Situationen im Experimentierprozess (Kap. 9.3.1.2) sowie die Analyse des Einflusses von Erfahrung auf die Gestaltung eines Experimentierprozesses auf Basis diesbezüglicher Äußerungen der Proband:innen im Rahmen der Stimulated Recall Interviews (Kap. 9.3.1.3) genutzt. Ausgehend von den rekonstruierten *Orientierungsrahmen* werden im Anschluss anhand ausgewählter Fallausschnitte die mittels *sinngenetischer Typenbildung* (Kap. 9.3.2) entwickelten prozessstrukturierenden Typiken *Vernetzungsgrad* und *Zielorientierung* vorgestellt. Die Analyse der zu Typiken gebündelten *Orientierungsrahmen* zeigt, dass die Typiken Zusammenhänge aufweisen und somit Kombinationsmuster identifiziert werden können, was eine *relationale Typenbildung* ermöglicht. Die inhärente Logik der *relationalen Typiken* bereitet die Systematisierung der Stufen der Dimension *Qualitätsausprägung* vor, d. h. es werden die Zusammenhänge der Typiken *Zielorientierung* und *Vernetzungsgrad* systematisiert (Kap. 9.3.3). Letzteres liefert die Grundlage für die Entwicklung der Qualitätsstufen, d. h. der Struktur der Dimension *Qua-*

litätsausprägung. Zur Finalisierung der Dimension *Fachmethodik* werden dann typische Handlungsmuster beim Experimentieren als *handlungsleitende Indikatoren* identifiziert (Kap. 9.3.3.2). Diese Indikatoren können als Niveauindikatoren verstanden werden. Mit ihnen kann der Perfomanz beim Experimentieren eine Qualitätsausprägung zugeschrieben werden. Sie ermöglichen folglich innerhalb des Kompetenzstrukturmodells einen Rückschluss auf die der Performanz zugrunde liegenden Dispositionen.

Abschließend wird, da die Performanz der Proband:innen für einen besseren Argumentationsgang nur ausschnitthaft beschrieben wurde, die Performanz aller Proband:innen durch die Erstellung von Fähigkeitsprofilen mittels des Kompetenzstrukturmodells vergleichend analysiert (Kap. 9.5).

9.1. Charakterisierung der Stichprobe

Als Vorbereitung auf die Entwicklung des Kompetenzstrukturmodells wird im Folgenden die Stichprobe hinsichtlich unterschiedlicher Merkmale (Kap. 9.1.1) charakterisiert und anhand vier ausgewählter Fälle ein Einblick in die Datengrundlage ermöglicht (Kap. 9.1.2).

9.1.1. Charakterisierende Merkmale

Als Stichprobe dienen drei Expert:innen sowie elf Student:innen im vierten Semester. Im Folgenden werden vorbereitend für die nächsten Schritte zunächst die charakterisierende Merkmale der Fälle vergleichend analysiert.[52]

Die Expert:innen sind strategisch und die studentischen Proband:innen gleichmäßig mittels Zufallsprinzip auf die zwei Aufgabenstellungen verteilt worden: Sieben Proband:innen (ein Experte/eine Expertin und sechs Student:innen) haben die leichtere Aufgabe 1 und sieben Proband:innen (zwei Expert:innen und fünf Student:innen) haben die komplexere Aufgabe 2 bearbeitet.

Die Bearbeitungsdauer der Aufgabe 1 beträgt über alle Proband:innen ($02:14:09 \pm 00:47:48$) Stunden und weist eine hohe Standardabweichung auf: Der schnellste Proband hat eine Stunde und 33 Minuten, der langsamste Proband hat drei Stunden 54 Minuten benötigt. Die Expertin/der Experte hat für die Bearbeitung der Aufgabe 1 zwei Stunden 13 Minuten benötigt. Ein Proband hat die Bearbeitung der Aufgabe nach rund zwei Stunden abgebrochen.

[52] Eine Übersicht über die Analyse der charakterisierenden Merkmale aller Proband:innen ist im Anhang A.4 zu finden.

Die Proband:innen der Aufgabe 2 haben für die Bearbeitung im Schnitt (02 : 26 : 32 ± 00 : 24 : 46) Stunden benötigt: Das schnellste Ergebnis lag nach 01:54:20 Stunden, das langsamste nach 03:11:01 Stunden vor. Die beiden Expert:innen haben 02:41:48 Stunden bzw. 02:20:00 Stunden gebraucht. Zwei Proband:innen haben die Aufgabenbearbeitung nach rund zwei Stunden abgebrochen.

Für beide Aufgabenstellungen sind jeweils strukturell identische Fragestellungen, die jeweils aus einer inhaltlichen und einer methodischen Komponente bestehen, entwickelt worden (Kap. 6.1). Bei der Bearbeitung der Aufgabe 1 hat ein Proband den inhaltlichen Aspekt der Fragestellung korrekt, zwei Proband:innen haben den inhaltlichen Aspekt unvollständig beantwortet und zwei Proband:innen haben die Fragestellung unabhängig vom Experiment, d.h. auf Basis theoretischer Überlegungen, unvollständig beantwortet. Zwei Proband:innen haben keinen der beiden Aspekte der Fragestellung beantwortet. Den methodischen Aspekt der Fragestellung hat keiner der Proband:innen bearbeitet. Bei der Aufgabenstellung 2 ergibt sich ein ähnliches Bild: Ein Proband hat beide Aspekte, vier Proband:innen haben den inhaltlichen Aspekt vollständig und zwei Proband:innen haben keinen der beiden Aspekte der Fragestellung beantwortet.

Die Qualität der durch die Proband:innen experimentell ermittelten Ergebnisse wird mittels Vergleich zu theoretischen Werten und der Bestimmung der relativen Abweichung eingeschätzt. Bei Aufgabe 1 schwanken die relativen Abweichungen zwischen 0,1% und 33900%. Bei der Aufgabe 2 schwanken die relativen Abweichungen zwischen 0,2% und 36%.

Weiterhin ist analysiert worden, wie viele fachinhaltliche Fehler bzw. Fehlannahmen gemacht wurden. Es sind nur die markiert worden, die einschneidenden Einfluss auf das weitere Vorgehen beim Experimentieren bzw. beim Beurteilen des Experimentes besitzen und eindeutig als fachinhaltliche Fehler oder Fehlannahme identifizierbar sind. Kleinere Unstimmigkeiten sind außen vor gelassen worden. Weiterhin sind Fehler und Fehlannahmen, die von den Proband:innen während des Experimentes korrigiert wurden, nicht mit eingeflossen. Für die Bestimmung der Anzahl ist in den Fallstudien markiert worden, wann ein Fehler bzw. eine Fehlannahme getätigt wurde. In den Stimulated Recall Interviews sind diese mit den Proband:innen diskutiert worden. Alle zuvor gefundenen Fehler bzw. Fehlannahmen sind durch die jeweiligen Proband:innen bestätigt worden. Die Markierungen wurden im Anschluss pro Proband aufsummiert. Für die Aufgabe 1 sind im Mittel $(1,0 \pm 1,1)$ fachinhaltliche Fehler über alle Proband:innen gemacht worden. Drei Proband:innen haben keinerlei fachinhaltliche Unstimmigkeiten und ein Proband hat drei gemacht. Bei der Bearbeitung der Aufgabe 2 sind im Mittel $(1,1 \pm 1,5)$ fachinhaltliche Fehler und Fehlannahmen aufgetreten. Drei Proband:innen haben keine und einer hat vier fachinhaltliche Fehler gemacht.

Auf die gleiche Art und Weise sind auch die messmethodischen Fehler und Fehl-

annahmen analysiert worden. Als messmethodische Fehler oder Fehlannahmen werden die Aspekte identifiziert, die einen messmethodischen Einfluss auf das Experimentieren oder Beurteilen des Experimentierens besitzen. Für die Aufgabe 1 sind im Mittel $(4,4 \pm 3,5)$ messmethodische Fehler über alle Proband:innen gemacht worden. Ein Proband hat keinerlei messmethodische Unstimmigkeiten und ein Proband hat zehn erzeugt. Bei der Bearbeitung der Aufgabe 2 sind im Mittel $(3,7 \pm 3,6)$ messmethodische Fehler und Fehlannahmen aufgetreten. Ein Proband hat keine und einer hat zehn Fehler bzw. Fehlannahmen gemacht.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass sich die Proband:innen hinsichtlich der charakterisierenden Merkmale bei der Bearbeitung der beiden unterschiedlich komplexen Aufgaben kaum unterscheiden, sodass im Folgenden eine gemeinsame Auswertung der beiden Aufgabenstellungen zu Gunsten einer erhöhten Varianz der Daten erfolgen kann.

9.1.2. Exemplarische Falldarstellungen

Die Charakterisierung der Stichprobe (Kap. 9.1) liefert bisher einen groben Überblick über die Datenlage, die in diesem Kapitel anhand ausgewählter Fälle vertieft werden soll. Dazu werden zunächst vier Fälle ohne weitere Interpretationen vorgestellt. Die Auswahl der Fälle erfolgt hinsichtlich der jeweiligen Eignung für eine möglichst charakteristische Darstellung der weiteren methodischen Schritte der Ergebnisdarstellung[53]. Die Fälle sind jedoch nicht als Eckfälle zu verstehen. Aufgrund der hohen Heterogenität der Vorgehensweise sind alle Fälle für die Entwicklung des Kompetenzstrukturmodells genutzt worden.

Die Fallbeschreibungen sind durch Zusammenfassung der *chronologischen Fallstudien* entstanden. Es handelt es sich folglich nicht um die Darstellung eines Auswertungsschrittes, sondern nur um eine illustrative Unterstützung der Darstellungslogik. Zur Reduktion auf das Wesentliche wurde auf eine ausführliche Beschreibung der einzelnen Schritte sowie auf einige Optimierungszyklen verzichtet. Es wird jedoch, um die Fälle möglichst vollständig präsentieren zu können, eine Auswahl aus allen erhobenen fallbezogenen Datentypen (Fragebogen, Videoaufnahme, Laborjournal, Internetsuchverlauf, Stimulated Recall Interview) genutzt, sofern sie für das Verstehen des Falles relevant sind. Die Benennung der einzelnen Fälle erfolgt, um die Anonymität zu gewährleisten, auf Basis der bearbeiteten Aufgabenstellung: Alle Proband:innen der weniger komplexen Aufgabestellung erhalten männliche Vornamen, alle Proband:innen der komplexeren Aufgabenstellung weibliche.

[53] Die Proband:innen wurden aufgrund ihres Fähigkeitsprofils (siehe Kap. 9.5) ausgewählt, das mittels des fertigen Kompetenzstrukturmodells erstellt worden ist.

Die Falldarstellungen von **Lea** und **Horst** (siehe Anhang A.5) können darüber hinaus jeweils als eine mögliche Musterlösung der jeweiligen Aufgabenstellung verstanden werden. Die beiden anderen Falldarstellungen werden weniger differenziert kommentiert.

9.1.2.1. Lea, die Expertin bei der komplexeren Aufgabe 2

Lea ist zum Zeitpunkt der Erhebung seit 12 Jahren Post Doc. Sie hat ihre Doktorarbeit im Bereich der Experimentalphysik abgeschlossen. Sie hat ihr Abitur mit 2,2 gemacht und als letzte Physiknote eine 1,0 gehabt. Zwischen Schule und Studium hat sie ein Freiwilliges Soziales Jahr (FSJ) gemacht. Sie hat alle Kurse des Vordiploms Physik durchschnittlich mit einer 2,0 abgeschlossen. Das Diplom hat sie mit 1,0 (Auszeichnung) bestanden. Sie absolvierte über zwei Semester ein traditionelles Anfängerpraktikum. Sie gibt an, dass sie *sehr gerne*[54] experimentiert und sich in ihrer Freizeit mit Physik beschäftigt, indem sie bastelt und experimentiert. Hinsichtlich der Frage nach dem Stellenwert des Experimentierens im Studium merkt sie an, dass Experimentieren in ihrem Studium gefühlt keine Priorität besessen habe. Im Stimulated Recall Interview führt sie dies näher aus:

> "Bei uns war das Studium so gebaut, dass man halt irgendwelche Experimente durchführen musste, ohne dass einem da großartig was zu erklärt wurde. Wir haben halt rumgemessen und irgendwelche Berichte geschrieben. Die Berichte waren letztendlich auch egal, wie gut oder schlecht die waren. Hauptsache man konnte irgendwo sehen, man hat irgendeine Fehlerrechnung gemacht." [00:02:57-6]

Rückblickend schätzt sie basierend auf ihrer Erfahrung während der Promotion und als Post Doc den Stellenwert des Experimentierens im Studium anders ein:

> "Naja, ich glaube, dass das einen sehr hohen Stellenwert hat, und man, gerade weil man es später im Alltag im Labor an jeder Stelle braucht, unbedingt üben muss. Deswegen sehe ich den Stellenwert schon sehr hoch. Ja, aber das erfordert eben eine aufwendige Betreuung, aufwendige Experimente und man muss von diesen Kochrezepten weg kommen. Auch und gerade im Fortgeschrittenen Praktikum." [00:03:37-8]

Sie fühlt sich im Themenfeld Elektrodynamik *unsicher*[55]. Bezogen auf die in der Aufgabe 2 genutzten Experimentiermaterialien (Digitale Multimeter, Frequenzgeneratoren, Spulen) fühlt sie sich *sehr sicher*. Beim Umgang mit Wechselstrom-

[54] Vierstufige Likertskala von sehr gerne bis sehr ungerne.
[55] Vierstufige Likertskala sehr sicher bis sehr unsicher.

kreisen fühlt sie sich hingegen *unsicher*. Im anschließenden Stimulated Recall Interview bestätigt sie diese Selbsteinschätzungen noch einmal und führt an, dass sie die Fachinhalte und Materialien lange nicht benutzt hat und sich dementsprechend unsicher fühlt [01:25:39-3].

In der experimentellen Aufgabenstellung 2[56] soll die Fragestellung beantwortet werden:

> In welchem Frequenzbereich verhält sich der induktive Widerstand einer Spule in einem Wechselstromkreis näherungsweise wie ein Ohm'scher Widerstand?

Lea beginnt die Aufgabenbearbeitung damit, dass sie in der Aufgabenstellung verschiedene Aspekte und Gedanken notiert. Zur Klärung der Fragestellung und des benötigten experimentellen Untersuchungsdesigns notiert sie sich zunächst *Wann wird |Z|=R? Frequenzabhängigkeit? Dimensionierung Widerstand*. Sie notiert sich im Fachwissenstext weiterhin die wurzelförmige Fitfunktion (inkl. Fitparameter) und markiert sich im Schaltplan, wo welche Variable variiert bzw. gemessen werden soll und was Konstanten sind (siehe Abb. 14). Im Anschluss zeichnet sie sich ein Diagramm und durchdenkt, welchen Signalverlauf sie erwartet und welche Bereiche des Verlaufs für sie interessant sind.

Nach der groben inhaltlichen Klärung sieht sie sich die Experimentiermaterialien und Geräte näher an. Sie sucht im Internet anhand der Typbezeichnung der Spule das Datenblatt mit den Herstellerangaben und notiert sich sowohl die Größenordnung der Induktivität [Statt 68mH werden aus Versehen 68μH notiert] als auch den Toleranzbereich bzw. die maximalen Belastungsgrenzen des Bauteils. Die gleichen Schritte durchläuft sie auch für den Widerstand.

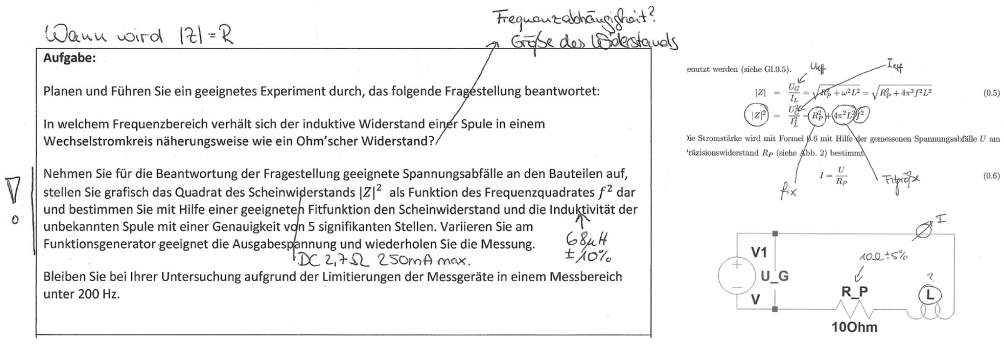


Abb. 14: Notizen von Lea zu Beginn des Experimentes (Aufgabe 2). Die Notizen wurden nachgestellt, um die Anonymität zu wahren.

[56] Die zur Verfügung stehenden Materialien können in Tabelle 3 im Kapitel 6.1 eingesehen werden.

Nach Klärung der Materialspezifika denkt sie darüber nach, ob die gleichzeitige Messung zweier Variablen mittels zweier Multimeter Messunsicherheiten verursachen, die Einfluss auf die Messergebnisse besitzen. Sie notiert sich zunächst ohne weitere Begründung, *ist wohl nicht relevant*. Im Stimulated Recall Interview geht sie darauf näher ein:

> "Ich glaube, dass was ich damit [Notiz] sagen wollte, war, es [ist] nicht erforderlich, beides [Spannung und Strom gleichzeitig] zu messen, dass ich ständig umstecke. Und hab mir gesagt, eine Variante muss genügen und dann habe ich ja irgendwann später oder so dazugeschrieben: Strom geringer, daher nehme ich stromrichtiges Messen." [01:01:12-3]

Auf Basis der vorangegangenen Überlegungen legt sie den Messplan fest. Sie will zunächst die Dimensionierung des Widerstandes bestimmen. Danach soll jeweils für eine feste Frequenz f die Stromstärke I und Spannung U gemessen und aufgetragen werden. Diese Messung will sie wiederholen und danach für verschiedene Frequenzen durchführen. Sie notiert sich, dass sie den Scheinwiderstand $|Z|$ als Fitergebnis sowie die Induktivität L und die Dimensionierung des Widerstands R als Fitparameter erhält.

Im nächsten Schritt will sie zunächst die Dimensionierung des Widerstandes bestimmen. Dazu verkabelt sie den Aufbau korrekt und sieht sich die zur Auswahl stehenden Multimeter an. Hier vergleicht sie im Besonderen die jeweiligen Messbereiche. Sie notiert sich weiterhin, welche Stromstärkewerte sie nicht überschreiten sollte, um die Bauteile nicht zu beschädigen. Im Anschluss integriert sie nacheinander die unterschiedlichen Multimeter in das experimentelle Setup und macht zur Analyse der Genauigkeit der Multimeter Testmessungen. Sie hält fest, dass mit allen drei Multimetern vier signifikante Stellen bei einer Spannungsmessung realisiert werden können und sich somit alle gleich eignen. Eines der Multimeter weist jedoch *einen merkwürdigen Wackelkontakt* auf und wird aussortiert. Sie notiert sich, dass sie für die Bestimmung der Stromstärke das Multimeter mit der besten Auflösung wählt.

Nach Festlegung der Messgeräte nimmt sie für die Bestimmung der Dimensionierung des Widerstandes mittels einer Strom-Spannungskennlinie fünf Messwerte (Stromstärke, Spannung) auf. Dabei notiert sie sich, dass das Multimeter für die Messung der Spannungswerte auf der letzten Stelle flackert. Sie legt deswegen eine Messunsicherheit für die Spannung von $\pm 0,003$ Volt fest. Als Messunsicherheit für die Stromstärke wählt sie die Ablesegenauigkeit des verwendeten Multimeters. Im Anschluss plottet sie die Messwerte inklusive Unsicherheiten in einem Auswertungsprogramm und führt einen linearen Fit durch. Als Ergebnis erhält sie $R = 10,6 \pm 0,15\Omega$ [Herstellerangabe: 10 Volt mit 3% Toleranz]. Im Anschluss kontrolliert sie noch einmal die Kabelverbindungen und führt für mehrere andere Frequenzen Testmessungen durch. Sie notiert sich danach, dass sie für die

Widerstandsbestimmung den falschen Messbereich [unpräziser] gewählt hat. Es sei mehr [Präzision] möglich gewesen. Das sei jetzt allerdings nicht relevant.

Weiterhin notiert sie sich bezogen auf die weiteren Messreihen noch, dass sie mit dem experimentellen Setup nicht unter einem Hertz messen kann. Sie macht weitere Testmessungen und notiert sich abschließend nachdem sie 1 Hertz durchgestrichen hat, dass eine Messung unter 20 Hertz nicht mit angemessener Genauigkeit möglich ist. Diesen Wert korrigiert sie nach einer weiteren Testmessung auf 15 Hertz.

Sie notiert sich für die nächsten sechs Messreihen für die Bestimmung des Scheinwiderstandes $|Z|$ eine Tabelle, in der die Frequenz f, die Spannung U, die Stromstärke I sowie Unsicherheiten von Spannung und Strom notiert werden sollen. Pro Messreihe werden sieben Messwertpaare in äquidistanten Schritten aufgenommen.

Nach der ersten Messreihe gibt sie die Daten in das Auswertungsprogramm ein und fittet den Datensatz. Als Ergebnis erhält sie $Z = (68,2 \pm 2,4)\Omega$. Weiterhin notiert sie sich bezogen auf den einen Teil der Fragestellung als Zwischenstand: *Schon hier wird deutlich, dass ich niemals ein Ergebnis mit 5 signifikanten Stellen angeben kann. Ich bräuchte viel präzisere Multimeter und viel mehr Messwerte.*

Im Anschluss nimmt sie die weiteren fünf Messreihen auf. Bei der letzten Messreihe probiert sie noch einmal, ob sie Ergebnisse für 0,1 mV erhält. Sie merkt jedoch, dass dies deutlich abweichende Werte liefert und deswegen wieder weggelassen werden soll.

Nach Abschluss aller Messreihen sowie deren graphischer Auswertung, denkt sie lange nach. Sie notiert sich *Überlegungen zur Theorie*. Sie notiert den funktionalen Zusammenhang und zeichnet ein Diagramm mit dem theoretisch zu erwartenden Signalverlauf. Sie notiert, dass sie entgegen der Erwartung eines wurzelförmigen Verlaufs einen linearen Zusammenhang sieht. Weiterhin hätte sie gerne kleinere Frequenzen aufgenommen, dazu hat sie jedoch keine geeigneten Messgeräte.

Sie probiert im Anschluss unterschiedliche Möglichkeiten aus, den Fit zu verbessern, findet jedoch keinen Optimierungsansatz. Sie bestimmt anhand des Fits die Dimensionierung der Induktivität zu $L = 72$mH [4% Abweichung von Herstellerangabe: 68 mH, 61Ω, 10% Toleranz] und als Widerstandswert 72Ω [Setzt sich zusammen aus dem Ohmschen Widerstand der Induktivität (61Ω) und dem Widerstand im Schaltkreis (10 Ω mit 3% Toleranz), insgesamt liegt eine Abweichung von 1% zu den Herstellerangaben vor].

Als die Unsicherheiten mit dem größten Einfluss auf das Experiment identifiziert sie die Krokodilklemmen, den Innenwiderstand des Multimeters bei der

Spannungsmessung sowie die Toleranz der Bauteile, die ggf. auch eine Frequenzabhängigkeit aufweisen könnten. Sie führt danach noch die Bestimmung der Messunsicherheiten für die Induktivität durch, indem sie die Gauß'sche Fehlerfortpflanzung anwendet.

Als Fazit hält sie fest, dass sie nicht den erwarteten wurzelförmigen Verlauf beobachten konnte. Weiterhin merkt sie an, dass sie aufgrund der falsch notierten Herstellerangabe für die Induktivität mit dem Experiment nicht belegen kann, wo sich der induktive Widerstand der Spule in einem Wechselstromkreis näherungsweise wie ein Ohm'scher Widerstand verhält.

In Bezug auf mögliche Optimierungen des Experimentes hält sie fest, dass sie lieber mit einem Oszilloskop arbeiten würde, weil sie dadurch die Einflüsse der Multimeter auf das Messergebnis minimieren könnte, die ihrer Meinung nach nur schlecht für die Messung von hohen und niedrigen Frequenzen genutzt werden konnten.

9.1.2.2. Elisa, die Fortgeschrittene bei der komplexeren Aufgabe 2

Elisa ist zum Zeitpunkt der Erhebung im vierten Semester. Sie hat ihr Abitur mit der Note 1,5 gemacht und als letzte Physiknote eine 1,0 gehabt. Sie hat direkt nach der Schule das Studium aufgenommen. Sie hat alle Kurse bis zum vierten Semester durchschnittlich mit einer 1,5 abgeschlossen. Sie absolvierte über zwei Semester das Paderborner Physik Praktikum und ein Semester ein traditionelles Anfängerpraktikum. Sie gibt an, dass sie *sehr gerne*[57] experimentiert und sich in ihrer Freizeit mit Physik beschäftigt, indem sie mit Elektronik bastelt und experimentiert.

Hinsichtlich der Frage nach dem Stellenwert des Experimentierens im Studium merkt sie an, dass dem Experimentieren vor allem durch das Praktikum ein hoher Stellenwert in den ersten drei Semestern zukommt. Danach werden nur noch gelegentlich Experimente in Vorlesungen genutzt und der Stellenwert sinkt plötzlich ab. Im Stimulated Recall Interview führt sie näher aus, was sie aus den Laborpraktika mitgenommen hat:

> "Vor allem planvolles Vorgehen, auch im Umgang mit einer unbekannten Situation. Es war weniger, was wir genau gemacht haben. Das war dann eher ein bisschen Vertiefung, das war Wiederholung [...]. Es ging eher um die Arbeitsweisen selbst und, wie wir daran gegangen sind." [00:03:42-0]

[57] Vierstufige Likertskala von sehr gerne bis sehr ungerne.

Sie fühlt sich im Themenfeld Elektrodynamik *sicher*[58]. Bezogen auf die in der Aufgabe 2 genutzten Experimentiermaterialien schätzt sie sich als *sehr sicher* [Frequenzgeneratoren, Multimeter] und *sicher* [Spulen] ein. Beim Umgang mit Wechselstromkreisen fühlt sie sich *sicher*. Im anschließenden Stimulated Recall Interview, nachdem sie das Experiment durchgeführt hatte, bestätigt sie diese Selbsteinschätzungen [01:30:09-7].

In der experimentellen Aufgabenstellung 2[59] soll die Fragestellung beantwortet werden:

> In welchem Frequenzbereich verhält sich der induktive Widerstand einer Spule in einem Wechselstromkreis näherungsweise wie ein Ohm'scher Widerstand?

Elisa beginnt die Aufgabenbearbeitung, indem sie zunächst eine allgemeine Internetrecherche zu Wechselstromkreisen und Spulen macht. Im Stimulated Recall Interview führt sie ihre Gedankengänge dazu aus:

> "Worüber ich nachgedacht habe am Anfang war, was ich überhaupt weiß über die Impendanz über dieses Verhalten von Bauteilen im Wechselstromkreis, das war nicht viel. Wir haben das nicht so viel gemacht, ganz einfach. Daran habe ich relativ lange gehangen. Ich wollte nämlich nicht weiter machen, bevor ich nicht wirklich weiß, was ich, worum es geht. Dh. auch hier mit den Grundlagen, der Grundlagentext. Ich habe lange auf der ersten Seite verbracht. Ich hab das mehrmals gelesen, ich hab jetzt hier nur ein bisschen was angemarkert. Aber ich hab, glaube ich die erste Seite 3 mal gelesen, bevor ich umgeblättert habe, weil ich unbedingt wissen wollte, worum es jetzt geht [...]." [00:57:27-6]

Im Anschluss notiert sie sich die Aufgabenstellung unvollständig. Der Teilaspekt der Fragestellung zu den signifikanten Stellen wird nicht notiert und auch nicht weiter beachtet. Im Anschluss analysiert sie den funktionalen Zusammenhang zwischen der Frequenz und dem Scheinwiderstand, markiert sich die Variablen und die Fitparameter. Sie leitet sich die Formel aus den Vorgaben noch einmal ab und klärt für sich, welche Spannungen und Widerstandswerte variabel oder konstant sind bzw. gemessen werden sollen. In dem Zusammenhang misst sie die Widerstandwerte des Widerstandes und der Spule mit Hilfe eines Multimeters.

Dann zeichnet sie sich den Schaltplan auf und markiert sich dort die Charakteristika ihrer Bauteile (Widerstandswerte von Spule und Widerstand). Weiterhin notiert sie, welche Multimeter [manuelle Multimeter ohne automatische Messbereichswahl] sie für die zwei Messgrößen verwenden will. Dazu hat sie die Messbereiche

[58] Vierstufige Likertskala sehr sicher bis sehr unsicher.
[59] Die zur Verfügung stehenden Materialien können in Tabelle 3 im Kapitel 6.1 eingesehen werden.

der Multimeter miteinander verglichen. Im Stimulated Recall Interview merkt sie dazu an:

> "Dann hatte ich dann eine Auswahl an Multimetern liegen. Einige davon mag ich nicht aus dem einfachen Grund, dass sie von alleine ihren Messbereich wechseln. Die benutze ich, wenn es nicht anders geht. Ich machs aber nicht gerne. Eigentlich möchte ich meine Messgeräte so wählen, dass ich einen Messbereich festlegen kann, um dann darin zu bleiben, um nicht irgendwie einen Innenwiderstand zu wechseln, um nicht irgendwo irgendwas zu haben [...]. Deswegen habe ich mir dann 2 Multimeter glaube ich ausgesucht, die das nicht machen. Oder zumindest, die das machen können, aber die das in meinem Vorhaben nicht tun. Ja und dann waren es auch einfach die auch so ein bisschen, die am besten in der Hand lagen, die ich gut ablesen konnte und die ich gut anschließen konnte." [00:37:07-6]

Auf die Rückfrage, ob die möglichen Messbereiche der Multimeter für sie relevant waren, antwortete sie:

> "In dem Fall nicht. Ich glaube, die waren alle sowie so, dass sie hätten arbeiten können in dem Bereich, den ich zumindest erwartet habe. Ich habe ja keine hohen Spannungen erwartet. Ich bin mir relativ sicher, dass ich irgendwann mal ein bisschen rumgeguckt habe, um die Größenordnungen zumindest mal auszutesten." [00:38:08-8]

Nach der Wahl der Messgeräte beginnt sie das experimentelle Setup aufzubauen. Sie schaltet den Frequenzgenerator an und bemerkt, dass die Messwerte der Spannung stark schwanken [zweite Nachkommastelle]. Sie probiert ein anderes Multimeter aus und wechselt dann doch wieder zum geplanten zurück, weil auch da die Messwerte schwanken. Sie stellt alle Geräte aus, notiert sich ihren Messplan und die Beobachtung, dass sie erst ab 10 Hertz beginnen kann zu messen, weil die angezeigten Messwerte sonst zu stark schwanken. Sie legt fest, dass sie von 10 bis 50 Hertz in 1 Hertz-Schritten, von 50 bis 100 Hertz in 2 Hertz-Schritten und von 100 bis 200 Hz in 5 Hertz-Schritten messen möchte. Sie legt also äquidistante Schritte in unterschiedlichen Intervallen fest und scheint den für die Fragestellung interessanten Signalverlauf bis 50 Hertz zu vermuten. Im Stimulated Recall Interview sagt sie in Bezug auf das Festlegen des Messplans:

> "Was eher einen Einfluss auf meinen Messplan hatte, war der erste Messplan, also die erste Durchführung, ein bisschen mit den Geräten mehr zu arbeiten und dann zu erkennen, was die können und auch zu erkennen, wo jetzt eine Schrittweite sinnvoll ist. Wo überhaupt Schritte sinnvoll sind. Ich wusste ja nicht, wie sich das Ganze [Signalverlauf] verhält. Ich bin davon ausgegangen, dass ich in einem Bereich, im

> niedrigen Hertz-Bereich ein ohmsches Verhalten habe und in einem niedrigen Hertz-Bereich allerdings auch die Krümmung hin zum nicht ohmschen Verhalten, um dann hochzugehen. Ich glaub, das stand irgendwo in der Theorie, dass bei niedrigen Frequenzen das ohmsche Verhalten halt noch vorherrscht und dann bei hohen Frequenzen dieser anders abhängige Term da auftritt. Das war die Idee, die ich dann hatte, dass ich halt niedrige Frequenzen gerne genau aufnehmen möchte und hohe Frequenzen von mir aus dann ungenau aufnehmen kann." [00:46:35-5]

Im Anschluss beginnt sie mit der Aufnahme der ersten Messreihe [$V_{Peak-Peak}$=5 Volt][60] und nimmt die geplanten rund 90 Messwerte auf. Sie notiert sich, dass bis 30 Hertz ein großes Schwanken in den Messwerten zu beobachten war und eigentlich 5 Hertz-Schrittweiten von 30 bis 200 Hertz ausgereicht hätten.

Sie beginnt mit der Auswertung der Messreihe, indem sie die Daten in das Auswertungsprogramm eingibt und die Weiterverarbeitung der Messwerte und Messunsicherheiten dort mittels automatischer Berechnungen bestimmt. Im Anschluss plottet sie Scheinwiderstand zum Quadrat Z^2 gegen das Frequenzquadrat f^2 inklusive der jeweiligen Unsicherheiten, die aus den Ablesegenauigkeiten, die mittels Gaußscher Fehlerfortpflanzung auf die weiterverarbeiteten Größen übertragen wurden, bestehen. Anschließend fittet sie die Kurve linear (siehe Abb. 15).

Basierend auf den Fit-Ergebnissen bestimmt sie mittels der ermittelten Fit-Parameter die Induktivität der Spule $L = (71,8 \pm 0,2)$mH [Herstellerangabe: 68 mH, 61Ω, 10% Toleranz; 5,2%] und murmelt, die Schnellauswertung war erfolgreich.

Sie beginnt mit der Messwertaufnahme der zweiten Messreihe [$V_{Peak-Peak}$=3 Volt][61] Sie nimmt 35 Messwerte im Bereich von 30 bis 200 Hertz in 5 Hertz-Schritten auf [Wie nach der zweiten Messreihe festgelegt]. Im Anschluss wertet sie die zweite Messreihe wie die erste aus (siehe Abb. 15). Als Wert für die Induktivität bestimmt sie $L = (72,5 \pm 0,2)$mH [Herstellerangabe: 68 mH, 61Ω, 10% Toleranz; 6,2%].

[60] Im Stimulated Recall Interview wird diese Wahl nicht weiter begründet. Sie führt an, dass sie diese Spannung eingestellt hatte und dann weiter verwendet hat.

[61] Auch diese Spannung ist ohne weitere Begründung ausgewählt worden.

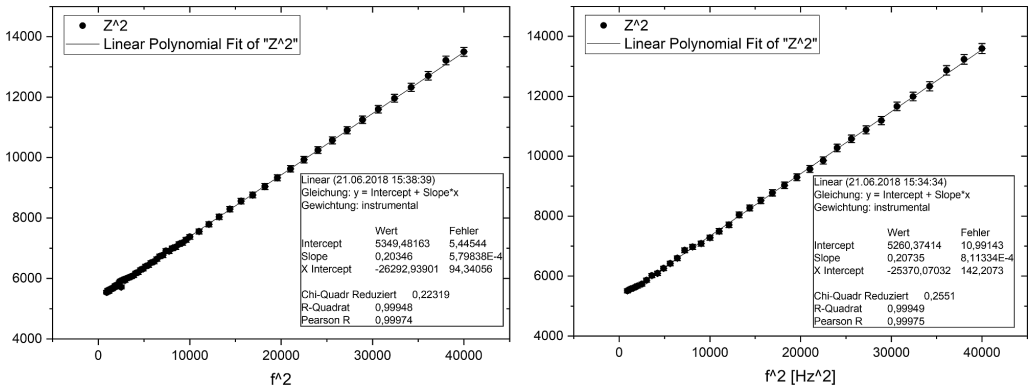


Abb. 15: Ergebnis Elisa Aufgabe 2. Plot und Fit der ersten Messreihe ($V_{pp} = 5$V) (links) und der zweiten Messreihe ($V_{pp} = 3$V) (rechts)

Sie beurteilt ihr Ergebnis im Laborjournal in Fließtextform:

> "Der Scheinwiderstand der Spule ist von 30 Hz bis 60 Hz nahezu konstant, danach steigt er stark an. In diesem Bereich kann die Spule im Wechselstromkreis daher mit einem ohmschen Widerstand verglichen werden. Für die Induktivität der Spule wurden (71,8±0,2)mH und (72,5±0,2) mH ermittelt. Die Werte liegen nahe beieinander, stimmen jedoch nicht überein." (Video: 02:15:37-02:31:01, Laborbuchseite 7)

Als mögliche Messeinflüsse identifiziert sie die Auflösung des Multimeters, die größer als angenommen ist, den Innenwiderstand der Schaltung sowie das Aufheizen der Bauteile. Als Optimierungen des Experimentes bei nochmaliger Durchführung führt sie an, andere Spannungsmessgeräte mit feinerer Skalenteilung, die nicht den Messbereich automatisch wechseln, nutzen zu wollen. Alternativ würde sie niedrigere oder höhere Spannungen anlegen, um die vorhandenen Messgeräte besser innerhalb der Messbereiche nutzen zu können.

9.1.2.3. Piet, der Anfänger bei der weniger komplexen Aufgabe 1

Piet hat kurz vor seiner Teilnahme an diesem Projekt das dritte Semester des Bachelor Physik Studiums abgeschlossen. Er hat sein Abitur mit 1,8 gemacht und als letzte Physiknote eine 1,7 gehabt. Er hat direkt nach der Schule das Studium begonnen. Er hat die Veranstaltungen zur Experimentalphysik, theoretischen Physik und Mathematik mit einer Durchschnittsnote von 2,5 abgeschlossen. Er absolvierte die ersten zwei Semester des neu entwickelten Paderborner Physik Praktikum 3P mit fachmethodischem Fokus und erreichte dort eine 1,0. Im dritten Semester hat er das traditionelle Anfängerpraktikum C mit einer 2,0 ab-

geschlossen. Er gibt an, dass er *gerne*[62] experimentiert und sich in seiner Freizeit Zeitschriften mit physikalischem Bezug liest. Hinsichtlich der Frage nach dem Stellenwert des Experimentierens im Studium merkt er an, dass Experimentieren einen hohen Stellenwert im Studium besitzt, weil da gelerntes Wissen angewandt und besser verinnerlicht werde. Er präzisiert dies im Stimulated Recall Interview folgendermaßen:

> "Einmal arbeitet man sich intensiver ein und die Fragen, die dann beim Einarbeiten aufkommen, werden dann ja irgendwie in der Experimentierphase so ein bisschen dadurch, dass man sieht, einfach schon teilweise beantwortet oder halt in der Gruppe beantwortet und es ist halt irgendwie ein anderes Lernen. Es ist halt nicht so Frontalunterricht wie eine Vorlesung. [...] Also es ist halt gar nicht so, dass ich irgendwie so eine Methode übernehme, das natürlich auch irgendwie, [...] aber das merke ich glaube ich eher gar nicht so. Das passiert glaube ich eher unterbewusst" [00:05:05-4]

Er fühlt sich *sehr sicher*[63] im Themenfeld Elektrodynamik. Im anschließenden Stimulated Recall Interview ändert er diese Selbsteinschätzung in *sicher*. Bezogen auf die in der Aufgabe 1 genutzten Experimentiermaterialien (Widerstände, Digitale Multimeter, Spannungsquellen) fühlt er sich vor dem Experiment *sicher*. Diese Selbsteinschätzung ändert er im Stimulated Recall Interview ebenfalls eine Stufe nach unten zu *unsicher* und führt an, dass er gemerkt hat, dass er es doch nicht so beherrscht [01:05:40-0].

In der experimentellen Aufgabenstellung 1[64] soll die Fragestellung beantwortet werden:

> Welcher Messaufbau eignet sich für eine möglichst präzise Bestimmung (fünf signifikante Stellen) zweier unterschiedlicher elektrischer Widerstände mittels der Aufnahme von Strom-Spannungskennlinien?

Piet startet nach dem Lesen der Aufgabenstellung und des Fachwissenstextes damit, dass er sich zunächst die physikalischen Zusammenhänge (Formeln), die zu messenden Variablen und den Schaltkreis für spannungsrichtiges Messen notiert. Er merkt an, dass er Strom messen will und deswegen stromrichtig messen muss. Hier wird deutlich, dass er das Grundprinzip der messmethodischen Unterscheidung anhand des Fachwissenstextes nicht durchdrungen hat. Weiterhin hat auch er die Fragestellung nur auf die Bestimmung der beiden unbekannten Widerstände reduziert und dementsprechend den methodischen Aspekt (Welche Messmethodik ist präziser?) außer Acht gelassen.

[62] Vierstufige Likertskala von *sehr gerne* bis *sehr ungerne*.
[63] Vierstufige Likertskala *sehr sicher* bis *sehr unsicher*.
[64] Die zur Verfügung stehenden Materialien können in Tabelle 3 im Kapitel 6.1 eingesehen werden.

Nach der inhaltlichen Klärung sieht Piet sich die Geräte und Experimentiermaterialien an. Er wählt zwei Lastwiderstände für die Messungen aus. Er notiert keinerlei Auswahlkriterien. Im Stimulated Recall Interview führt er an, dass diese für ihn am stabilsten wirken. Leistungsgrenzen von Bauteilen sind ihm nicht bekannt. Er bestimmt nicht die Größenordnung der Widerstände. In Bezug auf die Wahl der Multimeter und der Spannungsquelle notiert er, dass er die ausgewählt hat, welche " am einfachsten wirken". Im Stimulated Recall Interview erläutert er auf Nachfrage, dass er damit meinte, welche am simpelsten waren, weil er schon mit ihnen gearbeitet hat. Weitere Kriterien hat er bei der Wahl der Experimentiermaterialien und Geräte nicht angelegt. In Bezug auf das Multimeter merkt er noch an, dass sich die Messgenauigkeit der Multimeter an den Messbereich anpasst. Er hat ein Multimeter gewählt, das automatisch die Messbereiche anpasst. Im weiteren Verlauf des Experimentes ist er auf diesen Aspekt nicht noch einmal eingegangen. Weiterhin notiert er, dass die Innenwiderstände der Kabel und die Krokodilklemmen Messunsicherheiten in dem Versuch sind. Auch auf diese geht er im weiteren Verlauf nicht noch einmal ein.

Im Anschluss legt er den Messplan fest. Er will die Messreihen für beide Widerstände (10Ω, 2,3MΩ)identisch durchführen. Er legt als Messbereich 1 bis 10 Volt fest und will äquidistante Messpunkte in 1 Volt Schritten realisieren. Im Stimulated Recall Interview begründet er dies damit, dass er bei 10 Messwerten nicht so viel eintippen muss [00:42:49-3]. Der Messplan wird aus einem "Bauchgefühl" heraus festgelegt (im Stimulated Recall Interview bestätigt). Inhaltliche und methodische Überlegungen oder Charakteristika der Experimentiermaterialien und Geräte werden nicht genannt.

Piet baut spannungsrichtig unter Nutzung des Widerstandes R_1 [10Ω] auf [Widerspruch zu Planung s. o., jedoch inhaltlich korrekte Wahl]. Nachdem er die Komponenten und Geräte aufgebaut hat, verfolgt Piet mit dem Finger den Verlauf der einzelnen Kabel und gleicht den Aufbau mit dem gezeichneten Stromkreis ab.

Während der Messwertaufnahme liest Piet die Werte für die Stromstärke und Spannung von den Messgeräten. Eine Kontrolle der Anzeige der Spannungsquelle findet nicht statt. Beim Einstellen der Werte gibt er sich sehr viel Mühe exakte Werte einzustellen. Die Werte für die Stromstärke schwanken stark, was nicht als Beobachtung notiert wird. Ab 7 Volt bemerkt Piet einen verbrannten Geruch und regelt das Amperemeter während der Messung vom großen zum kleinen Messbereich runter. Schließlich stellt er 10 Volt ein und kontrolliert regelmäßig den Geruch. Nun schaltet er die Spannungsquelle aus, holt sich Handschuhe und legt den ausgebauten Widerstand auf eine Glasplatte. Er notiert sich, dass er beim zweiten Widerstand [dessen Größenordnung er nicht kennt] nur noch einen Messbereich von 0 bis 5 Volt nutzen möchte, weil der erste Widerstand verbrannt gerochen hat.

Nach Beendigung der ersten Messreihe wechselt Piet den Widerstand vom R_1 zu R_2 [2,3$M\Omega$] und vermisst diesen mit dem spannungsrichtigen experimentellen Setup. Er regelt die Spannung auf 1Volt. Da das Amperemeter nichts anzeigt, schaltet er den Messbereich um und schaltet das Multimeter aus und an. Er regelt die Spannung runter und beginnt den Aufbau auseinander zu nehmen und gleich wieder aufzubauen. Erneut wechselt er den Messbereich (mA) und misst. Anschließend wechselt Piet den Widerstand und nutzt noch einmal den R_1, bei dem er Messwerte erhält. Er nimmt sich einen anderen, neuen Widerstand aus dem Kästchen, klemmt diesen ein und regelt die Spannung auf 1 Volt. Da er wieder nichts misst, ändert er den Messbereich, überprüft die Klemmen und Verbindungen und nimmt sich schließlich ein anderes Multimeter sowie zwei neue Kabel. Er bestimmt nun mittels Multimeter, welches er als Ohmmeter nutzt, die Größenordnung des Widerstandes. Er legt das Multimeter weg, klemmt wieder den R_2 ein und stellt die Spannung auf 1 Volt ein. Er notiert sich, dass der Widerstand R_2 anscheinend zu groß für kleine Spannungen ist, weshalb er 5 - 10 Volt angelegen möchte. Auch diese Festlegung des neuen Messbereiches erfolgt nicht auf Basis theoretischer Überlegungen.

Piet stellt die Spannung auf 5 Volt ein und regelt in 1 Volt Schritten hoch. Dabei kontrolliert Piet beim Hochregeln nicht die Anzeige der Spannungsquelle, jedoch ob R_2 warm wird. Die erhaltenen Messwerte schwanken dabei stark, was er nicht notiert.

Nach Beendigung der Messwertaufnahme beginnt er mit der Dateneingabe in Origin. Er plottet die Messreihe für den R_1 und R_2 jeweils mit unterschiedlicher Achsenbelegung, wodurch er bei der Messunsicherheitsbestimmung für den R_1 eine Gaußsche Fehlerfortpflanzung machen muss, da sich der Wert für den Widerstand aus dem Kehrwert der Steigung ergibt. Er nutzt dafür die vom Programm bestimmten Messunsicherheiten.

Er plottet und fittet zunächst den R_1. Laut Notizen im Laborjournal, "um die Messwerte nach Fehlern zu gewichten". Er plottet keine Fehlerbalken. Aufgrund des Überschreitens der Leistungsgrenzen des Bauteils bei der Messwertaufnahme und des dadurch ausgelösten Temperaturanstiegs im Widerstand sind deutliche Abweichungen der Messwerte vom Fit zu erkennen. Diese werden nicht bemerkt bzw. diskutiert. Für den R_1 notiert er als Ergebnis $(8,772 \pm 0,615)\Omega$ [12,3% Abweichung von Herstellerangabe]. Im Anschluss plottet er die Messreihe des R_2, indem er R_1 überschreibt und fittet. Im zweiten Fit entspricht aufgrund der gewechselten Achsenbelegung die Steigung dem Widerstand. Als Ergebnis notiert er für den $R_2 = (2,05 \pm 0,03)M\Omega$ [11% Abweichung von Herstellerangabe]. Es wird keine Einordnung der Werte, z. B. durch einen Vergleich mit einem experimentellen oder theoretischen Referenzwert, vorgenommen.

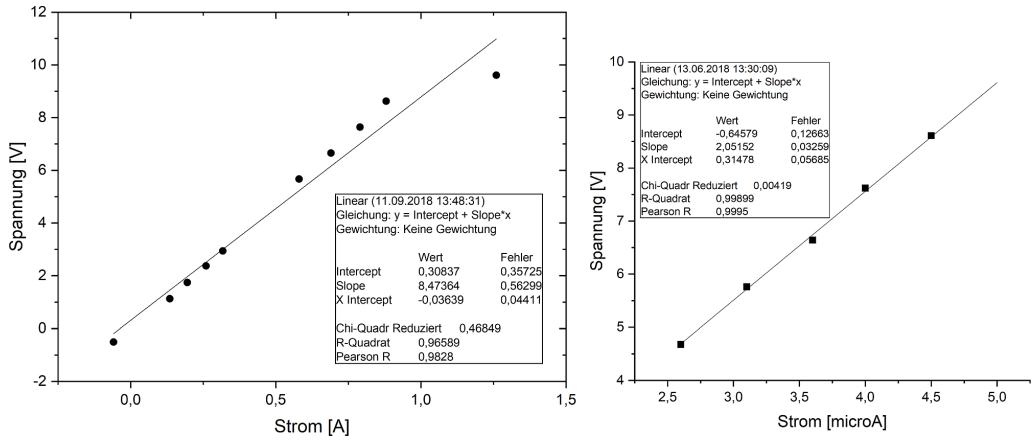


Abb. 16: Ergebnis von Piet in Aufgabe 1: Links: Rekonstruiert anhand Messdaten und abgeglichen mit Videomitschnitt, da die Auswertung vom R_1 vom Probanden überschrieben wurde.

Piet liest sich noch einmal die Aufgabenstellung durch und notiert, dass sich der durchgeführte Versuch nicht gut eignet, um die Widerstände möglichst genau (auf 5 sign. Stellen) zu bestimmen. Die Messbereiche seien zu ungenau und die verwendeten Widerstände zu groß und klein. Es müssten mehr Messungen durchgeführt werden. Des Weiteren müsste sowohl strom- als auch spannungsrichtig gemessen werden, um die Innenwiderstände der Multimeter besser einschätzen zu können". An dieser Stelle wird deutlich, dass er die zu untersuchende Fragestellung nur unzureichend gelesen oder verstanden hat, da die Aufgabe darin bestand, zu entscheiden, welcher der beiden messmethodischen Ansätze sich je Widerstand besser eignet.

9.1.2.4. Mia, die Anfängerin bei der komplexeren Aufgabe 2

Mia hat kurz vor ihrer Teilnahme an diesem Projekt das dritte Semester des Bachelor Physik Studiums abgeschlossen. Sie hat als letzte Physiknote eine 2,0 gehabt. Sie hat eine längere Pause zwischen Schule und Studium gemacht. Sie hat die Veranstaltungen zur Experimentalphysik, theoretischen Physik und Mathematik mit einer Durchschnittsnote von 4,0 abgeschlossen. Sie absolvierte die ersten zwei Semester des neu entwickelten Paderborner Physik Praktikum 3P mit fachmethodischem Schwerpunkt und erreichte dabei eine 1,3. Im dritten Semester hat sie das traditionelle Anfängerpraktikum C mit einer 1,0 abgeschlossen. Sie gibt an, dass sie *gerne*[65] experimentiert und in ihrer Freizeit Dokumentationen mit physikalischem Bezug liest.

[65] Vierstufige Likertskala von *sehr gerne* bis *sehr ungerne*.

Hinsichtlich der Frage nach dem Stellenwert des Experimentierens im Studium merkt sie an, dass Experimentieren einen essentiellen Stellenwert im Studium besitzt, da beispielsweise in der Industrie oft an konkreten, fertiggestellten Systemen gearbeitet wird. Sie präzisiert dies im Stimulated Recall Interview folgendermaßen:

> "Es ist ja so, dass man im Praktikum [...] auch immer das, was man irgendwie in irgendwelchen Vorlesungen hört [...] manchmal so gar keinen Bezug dazu hat, das erste Mal benutzt. Und das Praktikum hat mir soweit dabei geholfen, dass ich mich halt schon mehr in der Vorlesung frage, wie werden diese Dinge eigentlich verwendet. Weil nur die mathematische Formel [...] ist ja meistens auch immer sehr abstrakt. Ich glaube dabei hat es mir geholfen, die Dinge dann immer noch konkreter irgendwie so beurteilen zu können." [00:03:25-4]

Sie fühlt sich *unsicher*[66] im Themenfeld Elektrodynamik. Bezogen auf die in der Aufgabe 2 genutzten Experimentiermaterialien (Spulen, Digitale Multimeter, Frequenzgeneratoren) fühlt sie sich vor dem Experiment *unsicher*. Hinsichtlich der messmethodischen Aspekte [Strom-, Spannungsmessung] schätzt sie ihre Fähigkeiten als *sicher* ein.

In der experimentellen Aufgabenstellung 2[67] soll die Fragestellung beantwortet werden:

> In welchem Frequenzbereich verhält sich der induktive Widerstand einer Spule in einem Wechselstromkreis näherungsweise wie ein Ohm'scher Widerstand?

Mia beginnt die Bearbeitung der Aufgabenstellung mit der Frage an die Testleitung, ob es sich bei dem einen Bauteil um einen Kondensator handelt. Sie scheint dementsprechend die Aufgabenstellung und den Fachwissenstext zu diesem Zeitpunkt nicht tiefer gehend analysiert zu haben. Sie sieht im Anschluss in den Fachwissenstext und notiert sich, dass der Scheinwiderstand |Z| über das Ohmsche Gesetz bestimmt wird und denkt nach. Sie sucht im Internet wörtlich nach der vollständigen Fragestellung, die sie nicht findet. Stattdessen beginnt sie auf der Seite von Lernhelfer.de den Absatz *induktiver Widerstand* der Seite *Ohmsche induktive und kapazitive Widerstände im Wechselstromkreis* zu lesen.

Sie liest noch einmal im Fachwissenstext nach und schreibt dann den funktionalen Zusammenhang für Scheinwiderstände aus dem Fachwissenstext ab. Sie sieht im Anschluss die Experimentiermaterialien an, nimmt sich Kabel und legt alles zur Seite. Sie sucht im Internet nach *Multimeter verwenden* und *Multimeter*

[66] Vierstufige Likertskala sehr sicher bis sehr unsicher.
[67] Die zur Verfügung stehenden Materialien können in Tabelle 3 im Kapitel 6.1 eingesehen werden.

Spannungsmessung. Im Anschluss liest sie noch einmal den Fachwissenstext und notiert sich alle Formeln, die sie finden kann [inkl. Herleitung].

Sie sieht sich die Kabel vom Frequenzgenerator an, nimmt sich zwei Krokodilklemmen und nutzt diese, um eine Kabelverbindung zwischen Frequenzgenerator und Aufbau zu realisieren ([Wäscheklammerprinzip], siehe Abb. 17). Die eine Klemme löst sich, was korrigiert wird. Weiterhin schließt sie das Multimeter auf die gleiche Art an den Aufbau an und fragt, ob sie die Multimeter irgendwie kaputt machen kann.

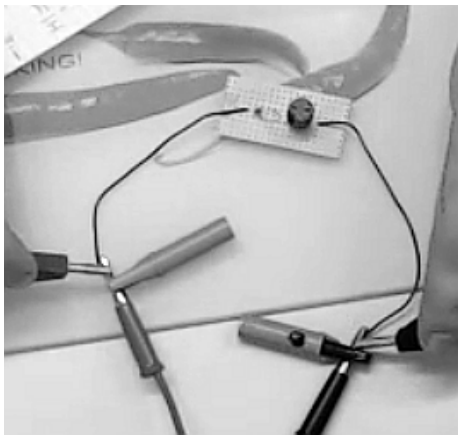


Abb. 17: In der Abbildung ist das experimentelle Setup (Wäscheklammerprinzip) von Mia (Anfängerin, komplexe Aufgabe) sowie die Vorgehensweise bei der Messung zu sehen.

Sie schaltet das Multimeter an und hält das Bananenstecker-Ende an die Verbindungsdrähte der Platine. Sie versucht, die Spannung über dem Widerstand und der Spule zu messen. Sie erhält jedoch keinen Messwert angezeigt. Sie schaltet den Frequenzgenerator an und drückt auf *Output*. Sie liest noch einmal im Fachwissenstext, drückt scheinbar wahllos diverse Knöpfe am Frequenzgenerator, hält die Kabel wieder an die Drähte und erhält weiterhin keinen Wert. Sie baut alles auseinander, verbindet nun die Kabel des Multimeter direkt mit dem Aufbau durch Krokodilklemmen, schaltet das Multimeter ein, baut diverse Male alles wieder auseinander und zusammen. Sie schaltet den Frequenzgenerator aus und liest noch einmal im Fachwissenstext. Im Anschluss sucht sie im Internet nach *Multimeter verwenden* und *Frequenzgeber*.

Sie baut das experimentelle Setup auseinander und denkt darüber nach, wie sie das Multimeter mit dem Frequenzgenerator verbinden kann. Sie fragt, ob der Frequenzgenerator direkt an das Multimeter anschließbar ist. Im Anschluss verbindet sie den Frequenzgenerator mit dem Multimeter und schließt diesmal auch die Platine korrekt an, indem sie nicht mehr das *Wäscheklammerprinzip* nutzt,

sondern die Bananenstecker mit den Krokodilklemmen verbindet. Sie schaltet die Geräte an, erhält einen Messwert und denkt nach.

Sie notiert sich das Ohmsche Gesetz, diesmal aufgelöst nach der Stromstärke I, notiert sich das erhaltene Messwertpaar und dass dieses bei 200 Hz gemessen wurde. Sie variiert die Messbereiche am Multimeter und denkt nach. Sie notiert sich den funktionalen Zusammenhang zwischen der Frequenz und dem Scheinwiderstand aus dem Fachwissenstext. Dann zeichnet sie eine Tabelle für die Messwertaufnahme. Die Spalten benennt sie mit U_G, U_{Rp} und f. (00:44:15-00:45:16)

Sie beginnt mit einer Messwertaufnahme, indem sie die Frequenz in unsystematischen Schritten (25-1000Hz) ändert. Sie liest noch einmal den Fachwissentext, denkt nach und blättert. Dann liest sie die Aufgabenstellung, lacht und sagt: " Ich habe jetzt erst gelesen, dass ich unter 200 Hz bleiben soll." . Sie macht den Frequenzgenerator wieder an und nimmt drei Messwertpaare (50, 25, 75 Hz) auf. Sie denkt nach und macht dann eine Schnellauswertung. Sie baut das experimentelle Setup zurück, rechnet, liest den Fachwissenstext und sucht im Internet nach *Scheinwiderstand*, *Lernhelfer Impedanz*.

Im Anschluss notiert sie sich $\Delta U = U_G - U_R$, stellt die Formel nach der Stromstärke I um und notiert sich, dass sie eine Tabelle anfertigen möchte und als Fitparameter I^2 und U_G^2 nutzen möchte. Sie notiert weiterhin die Vermutung, dass das Signal " einigermaßen linear verlaufen sollte für |Z| gegen f".

Sie beginnt eine neue Messreihe in 25 Hertz-Schritten und notiert sich neben die Tabelle *Messwerte ok?*. Sie stellt die Frage zum Ablesen der Multimeter abhängig vom verwendeten Messbereich: "Bedeuten 2 Volt Messbereich 0,0117 Volt?"

Sie beginnt mit der Auswertung über das Auswertungsprogramm, indem sie die zu plottenden Messwerte berechnet. Sie sucht im Internet nach *Frequenzabhängigkeit eines induktiven Widerstands*. Sie findet auf Leifi.de eine Formel für die Berechnung der Induktivität einer Spule ($L = \frac{U_{max}}{I_{max} \cdot 2\pi \cdot f}$). Sie setzt ein Messwertpaar ein und erhält den Wert 68,3mH [Herstellerangabe: 68 mH, 61Ω, 10% Toleranz, Abweichung 0,2%]. Sie sieht sich noch einmal die Werte im Auswertungsprogramm an, berechnet die Werte für den Scheinwiderstand erneut, was jedoch nichts ändert.

Sie erzählt der Testleitung: "Ich habe die Daten ausgewertet, also entweder habe ich was falsch gemacht, weil irgendwas passt hier nicht, weil ich habe gedacht, wenn ich Z gegen f auftrage, dass sich das linear verhält, wenn ich da jetzt ein Wachstum anfitte, das ist ja die falsche Richtung und das kann auch ne Ungenauigkeit sein."

Sie notiert sich im Laborbuch: Der Zusammenhang sollte einigermaßen linear verlaufen für $|Z|$ gegen f. Problem: Graph fällt (exponentiell?) ab. Der Vergleich von |Z| und Ohmschem Widerstand ist nicht möglich. Fehler? Ursache? Inkor-

rektes Verwenden des Frequenzgebers? [Zeichnung linearer Verlauf] So sollte es eigentlich aussehen! Aus der Steigung sollte dann L herauszuarbeiten sein.

Danach beendet sie das Experiment.

9.2. Erste Entwicklung der Dimension *Fachmethodik* - Analyseschritt formulierende Interpretation

Im Folgenden wird eine erste Entwicklung der Dimension *Fachmethodik* vorgestellt. Ziel des methodischen Schrittes (siehe Abb. 18) ist die induktive Herausarbeitung der Strukturelemente der Performanz sowie die Rekonstruktion ihres jeweiligen objektiven Sinngehaltes. Dazu werden die *chronologischen Fallstudien* zunächst einzeln und dann kontrastiv zu den restlichen Fällen analysiert.

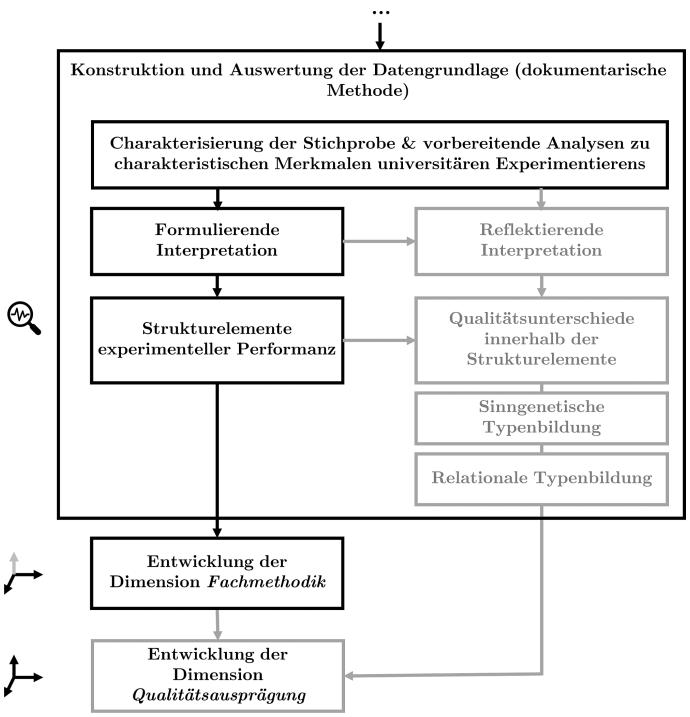


Abb. 18: Überblick über das methodische Vorgehen bei der Datenanalyse. Die Bestandteile, die nicht ausgegraut sind, werden in diesem Kapitel behandelt.

Methodisch werden die experimentellen Handlungen auf Sichtebene hinsichtlich ihrer thematischen, also fachmethodischen, Gliederung bzw. Struktur, d. h. nach ihrem objektiven Sinngehalt, strukturiert. Dieser Schritt wird vor dem Hintergrund gängiger Bezeichnungen für experimentelle Handlungsmuster getätigt. Er

erfolgt somit nicht rein induktiv, sondern unter Nutzung einer fachmethodischen Rahmung. Eine rein induktive Analyse erschien vor dem Hintergrund der hohen Fachspezifität der Handlungsmuster nicht zielführend. Die objektiven Sinngehalte entsprechen dabei jeweils Handlungsmustern (mehrere zusammenhängende Handlungen), die thematisch einer fachmethodischen Fähigkeit bezogen auf das Experimentieren zuzuordnen sind. Dazu werden zunächst die *chronologischen Fallstudien* hinsichtlich großer zusammenhängender Sinneinheiten, die in schulischen Kompetenzmodellen als Facetten (z. B. Planen, Durchführen, Auswerten) benannt werden, analysiert. In der Abbildung 19 wird dieser Schritt beispielhaft an einem Auszug der *chronologischen Fallstudien* von Horst und Piet (Experte und Novize Aufgabe 1) dargestellt. Als Ergebnis dieser Analyse ergeben sich nach mehreren Iterationen, in denen die Fallstudien miteinander verglichen und hinsichtlich des objektiven Sinngehaltes ausgeschärft wurden, trennscharfe *Orientierungsschemata* (siehe Tab. 5). Diese großen *Orientierungsschemata*, die die objektiven Sinngehalte der Performanz (Sichtebene) beinhalten, werden in den nachfolgenden Analysen *Facetten* genannt. Sie strukturieren die Dimension *Fachmethodik*.

Handlungsbeschreibung	Formulierende Interpretation
Piet nimmt aus dem ersten Kästchen den grünen und aus dem zweiten Kästchen den roten Lastwiderstand und legt beide auf die Kästchen.	Bauteile analysieren & wählen
Er sieht sich die Multimeter an und macht eine Notiz im Laborbuch. [*Auswahl Messgeräte: 2 Multimeter, die am einfachsten wirken*]. Er nimmt ein Multimeter (Metex) in die Hand und steckt zwei Kabel in die beiden Anschlussbuchsen.	Messgeräte analysieren & wählen
Im Anschluss macht er eine Notiz im Laborbuch [*Die Spannungsquelle, mit der ich schonmal gearbeitet habe*].	Geräte analysieren & wählen

Handlungsbeschreibung	Formulierende Interpretation
Horst bestimmt für alle Widerstände die Größenordnungen mittels Multimeter. Er nimmt sich aus jedem Kästchen einen Widerstand.	Bauteile analysieren & wählen
Er nimmt ein Multimeter (Metex), sieht es sich genauer an und fragt nach dem Wert für den Innenwiderstand. Notiert in Laborbuch. [*Zielsetzung: Dimensionierung des Experiments. Auswahl des Multimeters irrelevant → nur Größenordnung wichtig.*]	Messgeräte analysieren & wählen
Er sieht sich alle Spannungsquellen an: Einstellmöglichkeiten (Schaltet Geräte an, dreht alle Knöpfe). Notiert [*Stromquellen testen/angucken: Peaktech 0-30 V; HP 0-25 V; Agilent 0-20 V; Phillips 0-20V. Vorbereitung abgeschlossen. Nun Größenordnungen, in denen ich arbeiten kann, abstecken.*]	Geräte analysieren & wählen

Abb. 19: In der Abbildung werden beispielhaft anhand jeweils eines Ausschnitts aus dem Fall Piet (links) [00:04:44-00:11:33] und Horst (rechts) [00:13:06-00:24:00] die chronologische Fallstudie (jeweils linke Spalte) sowie die Ausschnitte der *formulierenden Interpretation* (jeweils rechte Spalte) visualisiert. Kursiv gesetzte Textstellen entsprechen schriftlichen Notizen der Proband:innen.

Tab. 5: Darstellung der mittels *formulierender Interpretation* identifizierten Facetten und Subfacetten, die die Performanz (Sichtebene) beim Experimentieren beschreibbar machen.

Facetten	Subfacetten
Physikalische Inhalte klären	• Analysieren des physikalischen Phänomens • Festlegen der Messmethodik • Festlegen der Auswertungsmethodik
Komponenten des experimentellen Setups auswählen	• Analysieren der verfügbaren Bauteile • Analysieren der verfügbaren Geräte • Analysieren der verfügbaren Messgeräte
Experimentelles Setup testen	• Funktionsanalyse des Setups • Durchführen von Schnellauswertungen • Analysieren von Messeinflüssen
Messplan ableiten	• Festlegen der Messbereiche • Festlegen der Schrittweiten • Festlegen der Anzahl der Messungen
Experimentelles Setup bedienen	• Aufnahme qualitativer Messdaten (Beobachtungen) • Aufnahme quantitativer Messdaten • Kontrolle der Funktionsfähigkeit
Messunsicherheit bestimmen	• Durchführen der Messunsicherheitsbestimmung • Einbeziehen systemspezifischer Einflussfaktoren
Messergebnis bestimmen	• Durchführen der Datenauswertung • Umgehen mit Korrekturfaktoren (z. B. Offset) • Umgehen mit unerwarteten Daten (z. B. Ausreißer)
Messergebnis beurteilen	• Messergebnis beurteilen • Messunsicherheit beurteilen • Qualitative Beobachtungen beurteilen
Experiment beurteilen	• Beurteilen des Experimentes • Ableiten von Optimierungen

Im Anschluss werden die den Facetten zugrunde liegenden Handlungsmuster tiefer gehend analysiert. Ziel ist, die *kleinstmöglichen, identifizierbaren Orientierungsschemata* herauszuarbeiten. Die kleinstmöglichen Orientierungsschemata werden analog zu schulischen Modellen im Folgenden als *Subfacetten* benannt. Die Herausarbeitung der Subfacetten durch die Analyse der Handlungsmuster innerhalb der Facetten erfolgt wiederum zunächst durch die Analyse der Einzelfälle sowie dem anschließenden kontrastiven Vergleich, um diese möglichst

trennscharf auszudifferenzieren.

Pro Facette können so zwei bis drei Subfacetten, also experimentelle Performanzelemente, identifiziert werden. Eine weitergehende Ausdifferenzierung der Handlungen ist nicht trennscharf möglich gewesen. Alle in den *chronologischen Fallstudien* beschriebenen experimentellen Handlungen können eindeutig einer der Subfacetten zugeordnet werden. In der Tabelle 5 sind die Ergebnisse des Analyseschritts der *formulierenden Interpretation* aufgeführt. Die Facetten sind bis zur Prüfung durch den zweiten Analyseschritt der *dokumentarischen Methode* zunächst als vorläufige Strukturierung der Dimension *Fachmethodik* zu verstehen.[68]

Experimentelle Handlungsmuster, die rein motorische Fertigkeiten umfassen, wie z. B. das Aufbauen des Experimentes, die Bedienung von (Mess-)Geräten oder das Ablesen von Messwerten, werden nicht als Facetten oder Subfacetten in das Modell aufgenommen.

Die innerhalb der *chronologischen Fallstudien* rekonstruierten Facetten und Subfacetten strukturieren die Performanzebene des Experimentierens. Sie stellen keine Experimentierphasen dar, wie es oftmals in Kompetenzmodellen aus dem schulischen Bereich der Fall ist (u. a. Schreiber 2009, Emden 2011), sondern Handlungsmuster, deren einzelne Handlungen dementsprechend über den gesamten Experimentierprozess verteilt auftreten können. Innerhalb des Gesamtprozesses bzw. der Facetten und Subfacetten wird nachfolgend der Analyseschritt der *reflektierenden Interpretation* angewendet.

9.3. Entwicklung der Dimension *Qualitätsausprägung* - Analyseschritt der reflektierenden Interpretation und komparativen Typenbildung

Für die mehrstufige Entwicklung der Dimension *Qualitätsausprägung* des Kompetenzstrukturmodells werden der Analyseschritt der *reflektierenden Interpretation* sowie zwei unterschiedliche Ansätze der *komparativen Typenbildung* genutzt.[69]

[68] Die Benennung der Facetten und Subfacetten erfolgt für eine höhere Vergleichbarkeit zu anderen Forschungsarbeiten sowie zur Erhöhung der Nutzbarkeit für Fachwissenschaftler:innen mit Hilfe von Begrifflichkeiten, die für die Operationalisierung experimenteller Fähigkeiten gängig sind.

[69] Aufgrund der hohen methodischen Komplexität werden im Folgenden zur Erhöhung der Leserfreundlichkeit die einzelnen Schritte anhand von Beispielen dargestellt. Eine vollständige Darstellung erschien weder zielführend noch hilfreich. Für die grobe Strukturierung wurden Anleihen bei der Darstellungslogik von Sander (2017) gemacht.

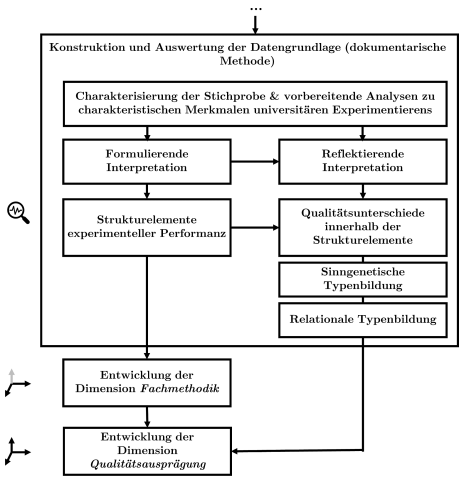


Abb. 20: Überblick über die methodische Entwicklungslogik.

In einem ersten Schritt werden auf Basis der *chronologischen Fallstudien* zunächst die Ergebnisse der vorbereitenden Analysen (Kap. 9.3.1) vorgestellt. Sie liefern eine Struktur für die *reflektierende Interpretation* und die Schritte der *Typenbildungen*. Durch den Vergleich von Expert:innen und Noviz:innen werden dafür charakteristische Merkmale des universitären Experimentierens auf Prozessebene (Kap. 9.3.1.1), auf Ebene von Einzelhandlungen (Kap. 9.3.1.2) sowie auf Ebene des Einflusses von Erfahrung auf das Experimentieren (Kap. 9.3.1.3) identifiziert.

Im Anschluss erfolgt der methodische Schritt der *reflektierenden Interpretation*, um die Qualitätsausprägungen experimenteller Kompetenz zu identifizieren. Hier werden im Kontext der Gesamtsituation die den einzelnen fachmethodischen Facetten und Subfacetten zugrunde liegenden handlungsleitenden impliziten Regelhaftigkeiten als *Orientierungsrahmen* rekonstruiert. Mittels kontinuierlicher Fallvergleiche werden auf der Suche nach dem jeweils *Typischen* der planvollen Handlungen die Orientierungsrahmen differenziert, durch den Vergleich von Expert:innen und Noviz:innen kontrastiert und voneinander abgegrenzt.

Die rekonstruierten *Orientierungsrahmen* dienen als Grundlage für die Rekonstruktion *sinngenetischer Typiken* (Kap. 9.3.2). Dazu werden im Rahmen der Darstellung unterschiedliche, möglichst kontrastive Fälle im Sinne eines Experten-Novizen-Vergleichs herangezogen, um so die *Orientierungsrahmen* durch das Auffinden von Gemeinsamkeiten zu *sinngenetischen Typiken* zu bündeln bzw. durch Unterschiede voneinander abzugrenzen. Es können zwei prozessstrukturierende *sinngenetische Typiken* abgeleitet werden: *Vernetzungsgrad* und *Zielorientierung*.

Nach der Entwicklung der *sinngenetischen Typiken* auf Basis der rekonstruierten *Orientierungsrahmen* ist deutlich geworden, dass die Proband:innen spezifische Kombinationen der sinngenetischen Typiken über die Dimensionen hinweg aufweisen, sodass eine *relationale Typenbildung* möglich war (Kap. 9.3.3). Die den

relationalen Typiken inhärente Logik bereitete die Systematisierung der performativen Qualitätsausprägungen für die Dimension *Qualitätsausprägung* (Kap. 9.4) vor.

Die *Orientierungsrahmen* und *Typiken* sind nicht für alle Facetten und Subfacetten relevant, sodass im Anschluss die im Kapitel 9.2 vorgestellten Facetten und Subfacetten final überarbeitet worden sind und zur Dimension *Fachmethodik* systematisiert werden konnten (Kap. 9.3.3.2). Während dieses Prozesses konnten für typische Handlungsmuster beim Experimentieren *handlungsleitende Indikatoren* identifiziert werden (Kap. 9.3.3.2). Diese Indikatoren können als Niveauindikatoren verstanden werden, d. h. anhand derer kann experimenteller Performanz eine Qualitätsausprägung zugeschrieben werden. Sie ermöglichen folglich einen Rückschluss auf die der Performanz zugrunde liegenden Dispositionen.

9.3.1. Vorbereitende Analysen - Charakteristische Merkmale universitären Experimentierens

Zur Vorbereitung des zweiten methodischen Schritts der *dokumentarischen Methode* werden in diesem Kapitel die Erkenntnisse aus vorbereitenden Analysen vorgestellt. Sie zielen auf die charakteristischen Merkmale des universitären Experimentierens ab.

Dazu werden die *chronologischen Fallstudien* nach dem Ansatz eines Experten-Novizen-Vergleichs analysiert, um Unterschiede auf Prozessebene (Kap. 9.3.1.1), auf Ebene von Einzelhandlungen (Kap. 9.3.1.2) sowie auf Ebene des Einflusses von Erfahrung auf das Experimentieren (Kap. 9.3.1.3) herauszuarbeiten.

9.3.1.1. Vorbereitende Analyse - Typische Prozessmuster

Die Analyse typischer Prozessmuster auf der Ebene des Gesamtprozesses stellt den ersten Schritt der vorbereitenden Analysen für die tiefer gehende Analyse der impliziten Regelhaftigkeit der Performanz dar. Dazu werden im Folgenden zunächst Evidenzen aus dem Bereich der Expertiseforschung beschrieben, die das Potential aufweisen, erste charakterisierende Merkmale des universitären Experimentierens darzustellen. Im Anschluss wird überprüft, ob diese Merkmale in der Stichprobe zu finden sind.

Eine Analyse aus dem Bereich der Experimentierkompetenzen in der Chemie hat ergeben, dass Proband:innen mit steigender Erfahrung statt eines *linearen* einen *iterativ-oszillierenden* Verlauf beim Experimentieren zeigen (K. Arndt 2016,

S. 88). Iterativ-oszillierend bedeutet, dass die Proband:innen zwischen den einzelnen Phasen des Experimentierprozesses (Planung, Durchführung, ...) hin und her springen und sich dementsprechend z. B. während der Durchführung Gedanken zur Planung oder Auswertung machen. Dieses Springen zwischen den Phasen, das zur Anpassung oder Weiterentwicklung vorangegangener Überlegungen führt, wird mit einer komplexeren "Gedankenstruktur"(K. Arndt 2016, S. 63) in Verbindung gebracht. Aufgrund der geringen Fallzahl sowie der gleichmäßigen Verteilung der Fähigkeiten der Proband:innen in der Studie konnte nicht abschließend geklärt werden, ob es einen Zusammenhang zwischen Mustern im Experimentierprozess und den individuellen Kompetenzausprägungen gibt. Im Folgenden soll analysiert werden, ob dies bei einer deutlich heterogeneren Leistungsverteilung möglich ist. Weiterhin können aus der Expertise-Forschung zum physikalischen Problemlösen (siehe Kap. 2.1.3) weitere Kriterien abgeleitet werden, die anhand der Prozessstruktur eine qualitative Unterscheidung von Expert:innen und Noviz:innen ermöglichen könnten. Expert:innen sind im Lösen von komplexen Problemen insgesamt schneller sowie fehlerfreier als Noviz:innen. Sie verbringen jedoch mehr Zeit mit der Problemanalyse und -repräsentation.

Als Vorbereitung für die Analysen werden die *chronologischen Fallstudien* der 14 Proband:innen mittels der herausgearbeiteten Facetten codiert und zusammen mit der jeweiligen Zeitspanne, die die Proband:innen für die Handlungen der Facette benötigt haben, in einem Phasendiagramm aufgetragen (siehe Abb. 21). Für eine bessere Übersichtlichkeit werden einzelne Facetten zusammengefasst. Weiterhin werden die Proband:innen mit Hilfe von zugewiesenen Kriterien in drei Gruppen eingeteilt. Die erste Gruppe, die Expert:innen, stellen die Proband:innen mit Masterabschluss dar. Die zweite Gruppe umfasst die Proband:innen, die das neue Praktikumskonzept 3P mit einem höheren Fokus auf die systematische Entwicklung von fachmethodischen Fähigkeiten und Fertigkeiten durchlaufen haben. Die dritte Gruppe umfasst die Proband:innen, die in den ersten beiden Semestern das neue und im dritten Semester das traditionelle Praktikumskonzept durchlaufen haben.

Zunächst wird anhand des Phasendiagramms deutlich, dass keine Unterschiede hinsichtlich der Bearbeitungsdauer oder Bearbeitungsmuster zwischen den beiden unterschiedlich komplexen Aufgabenstellungen (Weibliche versus männliche Vornamen) zu erkennen sind. Dies unterstreicht die Einschätzung aus Kapitel 9.1, dass die beiden Aufgabenstellungen gemeinsam ausgewertet werden können.

Anhand der zugewiesenen Außenkriterien wäre zu erwarten, dass die Experten (Gruppe 1) den am stärksten iterativ-oszillierenden Verlauf aufweisen. Weiterhin wäre zu vermuten, dass die Gruppe 2, die das neue Laborpraktikum mit Fachmethodik-Fokus durchlaufen hat, hinsichtlich des Iterativen-Oszillierens zwischen Gruppe 1 und 3 einzuordnen wäre. Diese theoretischen Überlegungen können jedoch anhand des Phasendiagramms nicht bestätigt werden. Es ist deut-

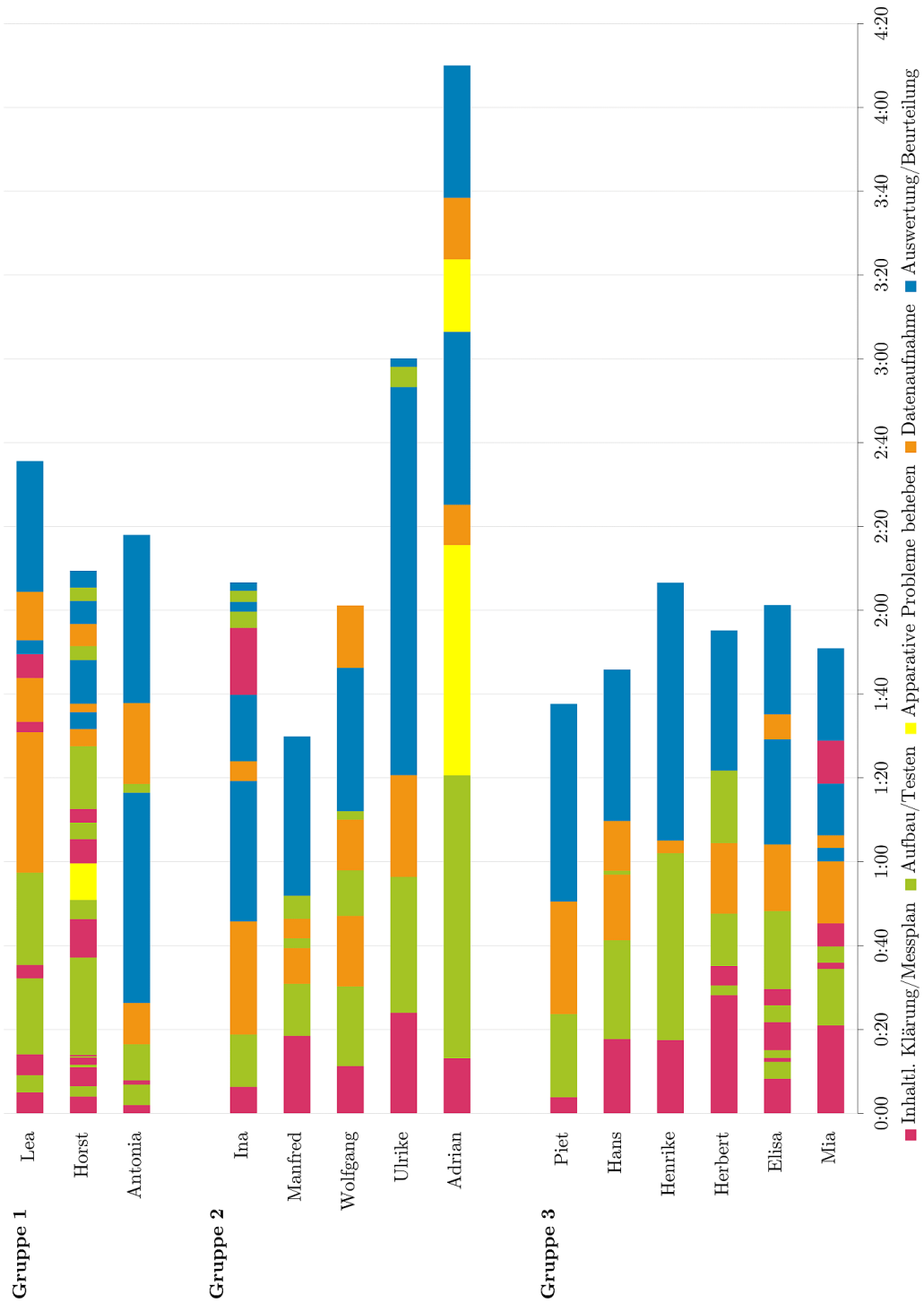


Abb. 21: In dem Phasendiagramm sind die Prozessverläufe aller Proband:innen aufgeteilt nach durch Außenkriterien eingeteilte Gruppen dargestellt. Die Facetten sind die, die im Kap. 9.2 herausgearbeitet wurden.

Tab. 6: In der Tabelle werden die Anzahl der groben physikalisch-inhaltlichen und messmethodischen Fehler dargestellt.

Proband:in	Gruppe	Inhaltliche Fehler	Messmethodische Fehler
Lea	1	0	0
Horst	1	0	0
Antonia	1	0	4
Ina	2	2	3
Manfred	2	0	4
Wolfgang	2	1	4
Ulrike	2	1	7
Adrian	2	2	8
Piet	3	3	3
Hans	3	0	2
Henrike	3	4	1
Herbert	3	1	10
Elisa	3	0	1
Mia	3	1	10

lich zu sehen, dass **Lea** und **Horst** (Gruppe 1) zusammen mit **Ina** und **Wolfgang** (Gruppe 2), **Elisa** und **Mia** (Gruppe 3) die ausgeprägtesten iterativ-oszillierenden Verläufe aufweisen. Weiterhin ist zu sehen, dass **Antonia** (Gruppe 1) und **Adrian** (Gruppe 2) scheinbar episodisch vorgegangen sind, also nacheinander linear die Aufgaben abgearbeitet haben. Wohingegen **Ulrike** und **Manfred** (Gruppe 2) sowie **Piet, Hans, Henrike** und **Herbert** (Gruppe 3) sehr linear die einzelnen Prozessschritte bearbeiteten.

Hinsichtlich der Zeitspanne, die die Proband:innen zum Lösen der experimentellen Aufgabenstellung benötigt haben, ist zu sehen, dass die Expert:innen der Gruppe 1 ($t = (2:24 \pm 0:12)$h) im Durchschnitt zwischen Gruppe 2 ($t = (2:38 \pm 0:49)$h) und 3 ($t = (2:02 \pm 0:17)$h) einzuordnen sind. Zur Analyse der Dauer der Problemanalyse und -repräsentation werden die Zeitspannen, die die Proband:innen mit den Prozessschritten *Inhaltliche Klärung/Messplan* sowie *Aufbau/Testen* verbringen, analysiert. Im Vergleich zu den Gruppen 2 ($t = (0:52 \pm 0:16)$h)und 3 ($t = (0:51 \pm 0:16)$h) ist im Rahmen der Standardabweichung kein erwarteter zeitlicher Vorteil auf Seiten der Expert:innen ($t = (0:56 \pm 0:28)$h) zu erkennen.

Im Rahmen der Charakterisierung der Stichprobe (Kap. 9.1) wurde die Anzahl der physikalisch-inhaltlichen sowie der messmethodischen Fehler, die einen Einfluss auf die Bearbeitungsqualität besitzen, bestimmt. In der Tabelle 6 sind die Ergebnisse dieser Auszählung noch einmal zusammenfassend dargestellt.

Die Proband:innen, die ein stark iterativ-oszillierendes Verlaufsmuster zeigen, unterscheiden sich hinsichtlich der Anzahl der Fehler deutlich. Während **Lea**

und **Horst** (Gruppe 1) und **Elisa** (Gruppe 3) kaum bis gar keine Fehler machten, konnten bei **Ina** und **Wolfgang** (Gruppe 2) fünf Fehler und bei **Mia** (Gruppe 3) sogar 11 Fehler gezählt werden. Bei **Horst** und **Lea** sowie **Elisa**, die angegeben hatte, dass sie sich in ihrer Freizeit mit Elektronik auseinandersetzt (Kap. 9.1.2.2), scheint das Verlaufsmuster ein Hinweis auf deren Expertise beim Experimentieren zu sein, wobei hier offen ist, warum **Antonia**, die einen Masterabschluss hat, nicht auch einen iterativ-oszillierenden Verlauf aufweist. Bei **Ina, Wolfgang** und **Mia** scheint das Verlaufsmuster dadurch ausgelöst worden zu sein, dass sie beim Experimentieren häufiger Schwierigkeiten mit dem physikalischen Inhalt oder beim Umgang mit den Experimentiermaterialien hatten und dementsprechend häufiger Überlegungen anpassen mussten.

Grundsätzlich zeigt sich, dass anhand der Experimentiermuster unter Zuhilfenahme von Außenkriterien für die Bildung der Gruppen keine konkreten Rückschlüsse auf den Expertisegrad der Proband:innen gezogen werden können. Deutlich ist jedoch geworden, dass die mittels Außenkriterien bestimmten Expert:innen sowie eine Probandin deutlich iterativere Prozessmuster gerade zu Beginn des Experimentes aufweisen, während die studentischen Proband:innen deutlich linearer beim Experimentieren vorgehen. Hier stellt sich nun die Frage, was die Expert:innen innerhalb der Phase anders machen als die Noviz:innen, d. h. welche Handlungen vollführen sie, auf welche Art und Weise und worin unterscheiden sie sich.

9.3.1.2. Vorbereitende Analyse - Herausfordernde Stellen im Experimentierprozess

Nach Analyse der Prozessmuster werden zur weiteren Vorbereitung auf die Tiefenanalyse der inneren Logik der experimentellen Handlungen mittels der *reflektierenden Interpretation* Prozessausschnitte, in denen die Proband:innen Lösungen für Herausforderungen gesucht haben, analysiert. Hier ist zu vermuten, dass die Analyse der herausfordernden Stellen im Experimentierprozess das Potential aufweist, erste Hinweise für mögliche Vergleichspunkte für die *sinngenetische Typenbildung* zu generieren. Im Folgenden werden beispielhaft und auszugsweise Strategien der Proband:innen beim Umgang mit technischen Schwierigkeiten vergleichend analysiert.[70]

Eine häufige Herausforderung beim Experimentieren stellt der Umgang mit den technischen Geräten dar. Während die meisten Schwierigkeiten durch Überprüfung der Korrektheit des experimentellen Setups sowie durch eine Änderung der

[70] Bei der Analyse konnten deutlich mehr herausfordernde Stellen identifiziert werden. Hier werden nur Ausschnitte der Ergebnisse berichtet, um die grundlegende methodische Herangehensweise zu illustrieren.

Einstellungen an den Geräten gelöst werden können, treten auch Herausforderungen auf, die den Einbezug weiterer Überlegungen benötigen. Ein Beispiel dafür stellt der Umgang mit unplausiblen oder nicht erzeugbaren Messwerten dar.

Der Experte **Horst** stellte während des Testens des experimentellen Setups fest, dass der angezeigte Messwert am Multimeter unplausibel ist. Er überprüft daraufhin zunächst auf Ebene des gesamten Setups, ob die Verkabelung korrekt ist (Abgleich mit theoretischen Überlegungen) und ob alle Kabel richtig angeschlossen sind (Analyse Geräteeigenschaften). Danach überprüft er, ob das Multimeter defekt ist, in dem er ein anderes in das Setup integriert. Er merkt dabei, dass das alternative Messgerät korrekte Werte anzeigt. Er wechselt wieder zum vorherigen Messgerät und analysiert die angezeigten Messwerte, indem er die Spannung schrittweise erhöht und die erhaltenen Werte mit den eingestellten abgleicht. Er wechselt den Messbereichsanschluss und analysiert wieder den Signalverlauf. Er kommt zu dem Schluss, dass die Sicherung des Multimeters für den kleinen Messbereich defekt ist. Er notiert sich, dass er das nicht gut findet, da er nun ein unpräziseres Messgerät benutzen muss. Er nutzt daraufhin das alternative Messgerät für den weiteren Prozess. Die gleiche Strategie zur Analyse des Setups (erst Gesamtsystem, dann Einzelkomponenten) nutzt auch **Lea**, die andere Expertin. Sie bricht die Analyse jedoch ab, sobald sie merkt, dass das Multimeter einen Defekt hat. Hier ist zu vermuten, dass der Grund für das Nichtfunktionieren für sie nicht relevant ist, weil es keinen Beitrag zur Beantwortung der Fragestellung besitzt.

Eine alternative Strategie beim Umgang mit unplausiblen Messwerten zeigt **Adrian**. Er merkt beim erstmaligen Anstellen des experimentellen Setups, dass er keine Messwerte am Messgerät angezeigt bekommt. Anders als bei **Horst**, bei dem das Problem auf ein defektes Gerät zurückzuführen ist, bedient **Adrian** die Spannungsquelle nicht korrekt, obwohl er diese extra gewählt hat, weil er sie schon aus dem Laborpraktikum kennt. **Adrian** regelt über 1,5 Stunden die Spannungsquelle nicht korrekt hoch, weil er den falschen Knopf benutzt (stellt die Spannung ein, obwohl er im Stromstärkemodus ist). Nachdem er kein Signal erhält, rechnet er zunächst nach, welche Größenordnung die Messwerte aufgrund des experimentellen Setups besitzen sollten (Abgleich mit theoretischen Überlegungen). Die so erhaltenen Größenordnungen stellt er ein und sieht weiterhin keine Messwerte am Multimeter. Er liest daraufhin bei Wikipedia nach, um zu entscheiden, ob er einen Vorwiderstand einbauen sollte, verwirft aber die Idee. Er wechselt daraufhin das Bauteil Widerstand, dessen Größenordnung er vorher mittels Multimeter nachprüft. Diese Handlung bringt ebenfalls nicht die erhoffte Wendung, weswegen er als nächstes das Multimeter wechselt. Danach überprüft er mehrfach den Sitz der Anschlüsse. Er ruft die Testleitung und erläutert das Problem. Beim Vormachen bedient er die Spannungsquelle plötzlich korrekt, sodass er danach die Messung beginnen kann. Ihm ist nicht klar, warum es plötzlich funktioniert und er überprüft auch nicht, woran es gelegen hat. Im weiteren Verlauf verwendet er die

beschriebene Strategie mit gleichem Ergebnis noch dreimal (!). Beim dritten Mal drückt er aus Versehen die "Hold-Taste" des Multimeters. Hier stellt der Wechsel des Messgerätes die Lösung dar. Diese Strategie des Ignorierens der Probleme beim Umgang mit den technischen Geräten ist ebenfalls bei **Ulrike, Wolfgang, Antonia** und **Manfred** zu beobachten.

Herbert hat die gleiche Schwierigkeit wie **Adrian**. Ihm wird, nachdem er die zweite Messreihe der Aufgabe 1 (Strom-Spannungskennlinie eines Widerstandes mit 2,2 MΩ) aufnehmen will, kein Messwert angezeigt. Bei ihm ist die Schwierigkeit, dass er den gleichen Messplan für den zweiten Widerstand genutzt hat wie für den ersten Widerstand von 10Ω. Er stellt also deutlich zu geringe Spannungen (nur bis 4 Volt) ein und erhält deswegen keine Messwerte angezeigt. Er überprüft daraufhin mehrfach den Sitz der Anschlüsse und ändert die Messbereiche aller Multimeter. Er wechselt das Bauteil Widerstand aus und absolviert die gleichen Schritte mit dem gleichen Ergebnis. Er ruft die Testleitung und fragt, was er tun soll. Er wird gefragt, ob er die Größenordnungen des Bauteils überprüft hat. Er misst daraufhin den Widerstandswert mittels Multimeter nach. Mit diesem Wert kann er augenscheinlich jedoch nicht bestimmen, wie viel Spannung er einstellen müsste. Stattdessen entscheidet er sich seinen Aufbau von spannungs- zu stromrichtig umzubauen, wodurch er weiterhin keine Messwerte erhält. Er bricht daraufhin das Experiment ab.

Die vergleichende Analyse unterschiedlicher Handlungsmuster beim Umgang mit technischen Schwierigkeiten zeigt, dass die Expert:innen eine funktionale Strategie für die Analyse experimenteller Setups (Gesamtsystem, dann komponentenweise) besitzen, indem sie ihre Schritte mit dem Abgleich zu den theoretischen Überlegungen bzw. zu Aspekten der Geräte verbinden und so zielgerichtet eine Lösung finden können. Bei den studentischen Proband:innen ist zu beobachten, dass die Handlungen, die zur Lösung führen sollen, nach der Analyse, ob der Aufbau korrekt zusammen gesteckt ist, eher zufällig und damit wenig systematisch wirken. Selbst, wenn sie einen Abgleich mit theoretischen Überlegungen machen, können sie die gewonnenen Erkenntnisse nicht nutzen, um eine passgenaue Analyse des Problems durchzuführen. Weiterhin ist zu beobachten, dass die Expert:innen dem Anschein nach im weiteren Prozess eine möglichst gute Bearbeitung des Problemtyps fokussieren. **Horst** scheint zu versuchen herauszufinden, warum das Gerät nicht funktioniert, um es ggf. doch weiternutzen zu können, da es seiner Ansicht nach am passendsten für das Experiment ist. **Lea** scheint hier eine gute Alternative in dem anderen Messgerät gefunden zu haben, sodass sie die Identifikation des Problems bei der Bearbeitung des Problemtyps nicht weiterbringt. Sie analysiert die Fehlfunktion folglich nicht weiter. Bei **Adrian** und den anderen Proband:innen scheint hingegen eher die Bewältigung des Problemtyps und nicht die Qualität der Bearbeitung im Vordergrund zu stehen, sodass sie nachdem sie es geschafft haben einen Messwert zu erhalten das Problem ignorieren und teilweise im späteren Verlauf erneut damit konfrontiert werden.

Bei **Herbert** führt das Nichtbewältigen des Problems sogar zum Abbruch der Bearbeitung.

Diese Unterschiede in der strategischen Vorgehensweise beim Experimentieren sind bezogen auf alle vorläufigen Facetten des Kompetenzstrukturmodells zu identifizieren.

9.3.1.3. Einfluss von Erfahrung auf das universitäre Experimentieren - Stimulated Recall Interviews

Abschließend wird der Aspekt "Gefühl für Größenordnungen und deren Einfluss auf das Experimentieren" auf Basis der Stimulated Recall Interviews tiefer gehend analysiert. Dieser Aspekt ist durch eine vergleichende Analyse der Stimulated Recall Interviews mit Fokus auf die Herausarbeitung charakteristischer Merkmale universitärem Experimentierens identifiziert worden, da Expert:innen und Noviz:innen sich hinsichtlich der Beschreibung des Einflusses von Erfahrung auf das universitäre Experimentieren deutlich unterscheiden. Ziel ist zu analysieren, wie die unterschiedlich fähigen Proband:innen den Einfluss von Erfahrungen mit Größenordnung von Messwerten hinsichtlich deren Einfluss auf die Gestaltung des Gesamtprozesses einschätzen. Es sollen dadurch Hinweise identifiziert werden, welche Aspekte aufgrund von Erfahrung das universitäre Experimentieren beeinflussen.

Ausgangspunkt für die Analyse ist die Beobachtung, dass die Expert:innen **Lea**, **Horst** und **Elisa** in den Interviews als Begründung für experimentelle Expertise *Intuition* anführen.

Horst hat in dem Fragebogen bei der Frage nach dem Stellenwert vom Experimentieren im Studium geantwortet "Experimentieren hilft Zusammenhänge zu erkennen und zu quantifizieren. Das Experiment ist der Verbindungspunkt zwischen Intuition und quantifiziertem Wissen". Im Stimulated Recall Interview soll er diesen Punkt präzisieren, was er wie folgt gemacht hat:

> "Naja letztendlich, das Physikstudium ist, oder überhaupt die Naturwissenschaft, ist zunächst eine mathematisch-theoretische Sache. Ich stelle ein Modell auf, vielleicht auf Basis nicht nur meines eigenen Wissens oder meinen eigenen Erfahrungen, sondern auch der Erfahrung von hoffentlich 150, 200 Jahren Wissenschaft zuvor und die Idee, nichts desto trotz kann ich natürlich als, auch wenn ich das lerne, kann ich natürlich aus dem Lehrbuch Wissen immer wieder wiederholen und kann das einfach lernen. Aber das reicht glaube ich nicht, um am Ende selbstständig, ein selbstständiger guter Forscher zu werden. Um

> das selbst zu machen ist wichtig, auch wenn [man] am Ende in Anführungszeichen nur Theorie machen will, wichtig, den Zusammenhang zu verstehen, zu verstehen, was bedeuten eigentlich die Gleichungen rein formal praktisch und was steht dahinter. Und letztendlich meine ich genau das. Durch das selbstständige eigene Experimentieren kann ich diese Zusammenhänge verstehen und auch ja letztendlich quantifizieren. Wenn nicht das Erhoffte rauskommt, kann ich es quantifizieren und feststellen, es stimmt irgendwas nicht. Und auf die Art und Weise ist das genau dieser Zusammenhang zwischen dem, was ich mit Intuition meine. Ich habe eine ungefähre Ahnung, was passieren sollte, hoffentlich passiert das, und wenn das passiert, dann weiß ich genau, wie es passiert, kann das quantifizieren. Die Intuition basiert letztendlich natürlich aus dem eigenen Erfahrungswissen, aber natürlich auch aus dem Studienwissen, aus dem ich sag jetzt mal theoretischen Wissen." (00:02:21-4 - 00:04:26-4)

Horst charakterisiert einen guten Forschenden dadurch, dass er Intuition besitzt. Für ihn stellt Intuition eine Mischung aus Erfahrungswissen und theoretischem Wissen dar. Er macht dementsprechend eine deutliche Unterscheidung zwischen dem physikalischen Wissen sowie den Wissensressourcen, die aufgrund jahrelanger Erfahrung erworben werden. Im Verlauf des Interviews präzisiert er seine Definition noch anhand der bearbeiteten experimentellen Aufgabenstellung:

> "Also Intuition ergibt sich immer aus dem theoretischen Vorwissen, aber natürlich auch aus praktischen Erfahrungen, wenn es so einen ähnlichen Aufbau, den ich schon vorher mal hatte. Wenn ich jetzt denselben Aufbau nochmal aufbauen müsste, wüsste ich schon worauf ich achten müsste. Wenn ich jetzt einen Aufbau komplett neu aufbaue, dann schaue ich in der Theorie nach, was für Werte sind, dann nutze ich natürlich auch nicht die komplexesten Formeln und probiere nicht gleich alle Fehlerquellen oder alles mit einzurechnen, sondern schaue erstmal dann in diesem Fall jetzt, ob U gleich R mal I stimmt und dann im nächsten Schritt würde ich mir überlegen, okay, wo spielt jetzt ein Innenwiderstand eine Rolle oder spielt keine Rolle. Und das wäre dann der nächste Schritt, den man drauf setzt für die detaillierte Auswertung oder das Verstehen, aber U gleich R mal I wird auch immer noch größenordnungsmäßig mir immer eine richtige Antwort geben, selbst wenn ich einen sehr kleinen oder einen sehr großen Widerstand in einem spannungs- oder stromrichtigen Aufbau jeweils in Anführungszeichen falsch verwende." (00:04:59-5 - 00:05:55-0)

Die Präzisierung des Begriffs Intuition anhand dieses Beispiels zeigt, dass mit Intuition neben dem physikalischen Wissen auch Erfahrung im Sinne von *Beispielproblemen* gemeint ist. Besonders werden hier die Aspekte, die beim Experimen-

tieren beachtet werden müssen, also Einflussfaktoren auf die Messwerterfassung sowie die Reduktion von Komplexität, in Form von Betrachtungen von Größenordnungen thematisiert.

Lea führt eine ähnliche Erklärung in ihrem Stimulated Recall Interview bezüglich des Aspekts der Intuition bzw. der Wirkung von Erfahrung auf das universitäre Experimentieren an:

> "Mein Paradebeispiel eines brillanten Forschers ist der 75 Jahre alte akademische Rat, den wir in der Arbeitsgruppe hatten, der nicht in Ruhestand gehen wollte. Wenn wir am Tisch zusammensaßen und gesagt haben, wir müssten doch die [XY] unserer Proben messen können, indem wir die Proben einfach in ein starkes Magnetfeld stecken und dieses herunterkühlen, ist viel zu kompliziert. Und dann hat er gesagt, ja kann man machen, dann müssen wir das einmal überschlagen, hat dann irgendwelche wilden Rechnungen angestellt und hat dann zum Schluss herausgefunden man braucht dafür 27000kA Strom, um das Magnetfeld zu erzeugen. Das haben wir dann lange nachgerechnet und zum Schluss sind wir zu dem Ergebnis gekommen, ja er hat Recht. Also das war einmal diese wahnsinnige Intuition, die er hatte und die Fähigkeit, ein Experiment blitzschnell von vorne nach hinten zu durchdenken und es einfach im Kopf einmal durchzuführen. Also das ist das, was man im Planungssektor braucht und bei diesen Aufbauenbereich da zeichnet sich ein guter Experimentator dadurch aus, dass er systematisch vorgeht und gleich mitdenkt, wenn ich das hier jetzt anschließe, passiert mir dann irgendwas? Brennt dann irgendwo was durch und das halt so aufbaut, das zum Schluss, wenn das Ding fertig ist, auch alles fertig getestet ist. Und man nicht erst irgendwas komplett aufbaut, dann feststellt, huch, gar nichts funktioniert, dann baut man alles auseinander und versucht irgendwas anderes. Also auch das systematische Herstellen von Aufbauten. Naja, bei der Durchführung da ist der gute Experimentator einer der sofort Kleinigkeiten bemerkt, sofort an dem Verlauf der Messkurve sieht, huch, da ist mir die Temperatur aus dem Ruder gelaufen oder was auch immer. Ja auswerten, da kann ich das nicht so präzise sagen, weil auswerten ja immer im stillen Kämmerlein passiert. Da weiß man ja immer gar nicht so genau, hat er das jetzt in einer halben Stunde gemacht, weil er so brillant war oder hatte er da 6 Monate drüber nachgedacht und es immer wieder anders versucht. Natürlich ist es schön, wenn man sowas fix kann." (00:07:12-6 - 00:09:44-9)

Erfahrung bzw. Expertise zeichnet sich ihrer Meinung nach durch eine "wahnsinnige Intuition" , also einem Gefühl für quantitative Zusammenhänge aus. **Lea** führt dazu näher aus, dass Intuition für sie die systematische Herangehensweise,

das multiperspektivische Durchdenken von Einflussfaktoren und Rahmenbedingungen sowie eine sehr große Schnelligkeit beim Durchdenken der Aspekte ist. Intuition ist hier dementsprechend nicht als Handlungen zu verstehen, die aufgrund einer "Ahnung" getätigt wird, vielmehr handelt es sich hierbei um eine differenzierte Analyse basierend auf unterschiedlichen Wissensressourcen. Im Speziellen scheinen wie bei **Horst** hier Wissensressourcen über Einflussfaktoren bei bestimmten Experimenten und Größenordnungen von Variablen und Parametern die entscheidenden Bestandteile von Expertise zu sein.

Elisa, die als Fortgeschrittene charakterisiert werden kann, hebt im Stimulated Recall Interview den Einfluss eines "Bauchgefühls" auf das Experimentieren hervor:

> I: Was glaubst du, woher dieses Gefühl kommt, also, wie hast du dir das angeeignet, dieses Bauchgefühl?
> E: "Ganz viel Arbeit damit. Viele von den Bauchgefühlen habe ich einfach durch LTSpice. also einfach durch die Simulation von super vielen Schaltungen mit irgendwelchen Bauteilen, durch den Abgriff von Spannungen an jedem einzelnen Bauteil, einfach um die Schaltung zu verstehen, und wenn ich die Schaltung verstehe, verstehe ich auch die einzelnen Bauteile, die da drin sind. Ja und das war auch so ein bisschen ein Wachsen darin. Also man mit Einzelbauteilen anzufangen, kleineren Schaltungen anzufangen, um dann am Ende auf eine Kippstufe zu kommen, irgendeine Verstärkerschaltung oder halt ein Brückengleichrichter, wo dann halt viele Bauteile drin sind, wo ich vorher weiß, wie die sich verhalten sollten, und wo ich dann auch sehe, wie sie sich im eingebauten Zustand dann verhalten, wie die Spannungsverläufe aussehen, wie bei einer gewissen Größenordnung irgendwas aussieht. Solche Sachen. Ich weiß nicht, dass ist viel ... ja viel vorher schon damit zu arbeiten und viel vorher damit auch teilweise wirklich nur rumzuprobieren. Einfach irgendwas auszuprobieren, um zu gucken, wie sich ne Schaltung bei irgendeinem Wert verhält, welchen... wenn ich mit einem Brückengleichrichter arbeite, wie ich den Kondensator anpassen kann, den ich zur Glättung habe, wie ich mit meiner Spannungsquelle arbeiten kann, wie ich ja da die Frequenz einstellen kann und welche Werte ich da irgendwie.. auch wie das ein bisschen zusammenspielt, dann die beiden Werte im Wechsel anzupassen, um dann irgendwann darauf zu kommen so verhält sich das, so kann sich das nur verhalten. Ich hab dieses Bauteil da drin und das ist der Verlauf, den ich sehen kann bei der Größenordnung, bei der Diode." (00:14:32-8-00:16:18-7)

Elisa betont in ihrer Ausführung zur Relevanz von Erfahrung auf das universitäre Experimentieren vor allem das Zusammenspiel unterschiedlicher Komponenten

in einem Stromkreis. Sie scheint durch das "Ausprobieren" unterschiedlicher Konstellationen in dem Bereich ein Gefühl für Größenordnungen sowie für den Einfluss einzelner Komponenten auf ein Gesamtsystem bekommen zu haben. Anders als bei **Lea** und **Horst**, die beide langjährige Erfahrungen aufweisen, wird deutlich, dass *Elisa* im Themenbereich Elektrodynamik Erfahrungen mit unterschiedlichen Beispielproblemen gesammelt hat, ihr gelingt jedoch (noch) nicht die Abstraktion auf das universitäre Experimentieren allgemein. Dies ist vor dem Hintergrund, dass sie sich im vierten Semester befindet und dementsprechend wenige Experimente aus unterschiedlichen Themengebieten kennen gelernt hat, auch plausibel.

Henrike antwortet auf die Frage, ob sie bei der Bearbeitung irgendwelche Größenordnungen im Kopf hatte, folgendes:

> "Ja gut, ich sag mal so, durch die Aufgabenstellung wusste man, es musste irgendwo unter 200Hz liegen. Und naja, man hat so, im Stromnetz sind ja irgendwo die 50-60 Hz anliegend und das ist definitiv Wechselstrom. Also hätte ich auch die Grenze irgendwo unterhalb dieser 60 Hz erwartet, aber da ich mir sehr sehr unsicher war im Umgang mit den Wechselstromkreisen... der Rest war gar nicht so... aber die Wechselstromkreise haben mich doch sehr verunsichert, deswegen hatte ich nicht so die Vorstellung, was mich wirklich erwartet." (00:25:10-2 - 00:27:05-3)

Bei **Henrike** wird deutlich, dass sie bei der Bearbeitung der Aufgabenstellung keine konkreten Größenordnungen von Messwerten im Kopf hatte, da sie bisher noch keinerlei Erfahrungen mit Wechselstromkreisen im Experiment gesammelt hat. Sie nutzt stattdessen Werte aus der Aufgabenstellung bzw. Werte, die ihr aus dem Alltag bekannt sind, um ihre Messwerte hinsichtlich der Plausibilität einzuschätzen. Hier ist deutlich zu erkennen, dass sie genug Erfahrungen im Bereich des Experimentierens gesammelt hat, um zu wissen, dass Größenordnungen beim Einschätzen der Korrektheit von Messwerten helfen, jedoch noch so wenig Erfahrung hat, dass sie sich diese Werte auf andere Weise generieren muss.

Alle anderen Proband:innen haben in den Stimulated Recall Interviews keine konkreten Ideen an, inwiefern vorherige Erfahrungen mit dem Experimentieren bzw. ein "Gefühl für Größenordnungen" Einfluss auf ihre Bewältigung der experimentellen Aufgabe genommen haben. Vier Proband:innen verneinten, dass ein "Gefühl für Größenordnungen" beim Experimentieren hilft.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass bei Expert:innen und Fortgeschrittenen vorangegangene Erfahrungen hinsichtlich des Experimentierens einen expliziten Einfluss auf die Bewältigung der Aufgabenstellungen besessen haben. Weiterhin ist deutlich geworden, dass Expert:innen und Fortgeschrittene den experi-

mentellen Einflussfaktoren (Messunsicherheiten) einen erhöhten Einfluss auf die Generierung von Messwerten zuschreiben.

9.3.2. Vorstellung der sinngenetischen Typenbildung

Die Analyse der Performanzebene mittels der *formulierenden Interpretation* lieferte bisher eine Strukturierung der experimentellen Handlungen (Kap. 9.3.1.1). Weiterhin ist anhand der vorbereitenden Analysen deutlich geworden, dass Unterschiede zwischen Expert:innen und Noviz:innen sowohl auf Gesamtprozessebene, auf Facettenebene und auf Ebene der Erfahrung auftreten. Diese Erkenntnisse liefern die Grundlage für die nachfolgende *reflektierende Interpretation*. Analysiert werden die charakterisierenden und strukturierenden Aspekte der experimentellen Handlungen der Proband:innen hinsichtlich der implizit zugrunde liegenden Regelhaftigkeiten. Es sollen folglich auf der Performanzebene Hinweise gesammelt werden, um über diese einen Zugriff auf die kognitive Ebene zu erhalten.

Dafür wird im ersten Analyseschritt der *reflektierenden Interpretation* zunächst jeder Fall einzeln analysiert, indem innerhalb der Facetten und Subfacetten die jeweiligen *Orientierungsrahmen* rekonstruiert werden. Ziel ist, die jeweils handlungsleitenden Merkmale der unterschiedlich fähigen Proband:innen zu extrahieren. Mit handlungsleitenden Merkmalen sind die den Handlungen zugrunde liegenden impliziten, physikspezifischen Wissensressourcen gemeint, die eine experimentelle Handlung auslösen oder steuern. Die Identifikation dieser Ressourcen kann Hinweise dazu liefern, wie qualitativ unterschiedliche Ausprägungen der experimentellen Performanz strukturiert werden können.

Die *Orientierungsrahmen*, innerhalb derer die Handlungen absolviert werden, wurden dann in einem zweiten Analyseschritt über alle Fälle miteinander verglichen und im Rahmen einer *sinngenetischen Typenbildung* zusammengefasst, indem das jeweils *Typische* der Orientierungsrahmen herausgearbeitet worden ist[71]. Der Vergleich sehr kontrastiver bzw. sehr ähnlicher *Orientierungsrahmen* führte schlussendlich durch diese induktive Rekonstruktion zu zwei *sinngenetischen Typiken*, die über alle Fälle tragfähig und innerhalb derer insgesamt 10 *Orientierungsrahmen* gebündelt sind.

Als *sinngenetische Typiken*, die jeweils auf Basis der handlungsleitenden Merkmale der einzelnen Orientierungsrahmen rekonstruiert worden sind, ergeben sich:

- Vernetzungsgrad (Fokus Facetten)

[71] Bei diesem Schritt sind diverse Diskussionen mit Fachdidaktiker:innen und Fachwissenschaftler:innen geführt worden, um sowohl der Logik der *dokumentarischen Methode* als auch der Logik der Fachwissenschaft Physik gerecht zu werden.

- Zielorientierung (Fokus Gesamtprozess)

Im Folgenden werden die induktiv gebildeten *sinngenetischen Typiken* vorgestellt und mittels ausgewählter Fallvergleiche illustriert (Kap. 9.3.2.1 und 9.3.2.2).

9.3.2.1. Sinngenetische Typik 1 - Vernetzungsgrad

Die Analyse der Prozessmuster (Kap. 9.3.1.1) hat gezeigt, dass die Bearbeitungen der experimentellen Aufgabenstellungen unter Nutzung unterschiedlicher Prozessabläufe erfolgt. Zur Klärung dieses Befundes ist innerhalb der einzelnen Facetten und des Gesamtprozesses analysiert worden, welche implizite Wissensressourcen innerhalb der Orientierungsrahmen auf welche Art und Weise genutzt werden. Die gefundenen Orientierungsrahmen konnten durch kontrastive Fallvergleiche zu fünf Orientierungsrahmen innerhalb der sinngenetischen Typik *Vernetzungsgrad* zusammengefasst werden. Im Folgenden werden diese am Beispiel der Facette *Messplan ableiten* vorgestellt und durch Ausschnitte aus den *chronologischen Fallstudien* illustriert. Diese Facette wird an dieser Stelle gewählt, weil innerhalb dieser sehr viele Erkenntnisse aus den anderen Experimentierfacetten miteinander verknüpft werden müssen, um einen möglichst passgenauen Messplan in Bezug auf die Fragestellung erstellen zu können. Diese Facette eignet sich daher am Besten als Illustration. Für den beispielhaften kontrastiven Vergleich werden **Lea** und **Antonia** (Expertinnen), sowie **Piet** (Gruppe 3, traditionelles Praktikum) und **Adrian** (Gruppe 2, fachmethodisches Praktikum) ausgewählt. Hier muss allerdings angemerkt werden, dass die jeweiligen Orientierungsrahmen sich nicht ausschließlich auf die ausgewählten Personen und auch nicht auf die hier zur Illustration gewählte Facette beschränken. Die Wahl einer speziellen Facette und verschiedener Proband:innen soll lediglich die zugrunde liegende Erkenntnislogik verdeutlichen.

Lea, die die experimentelle Aufgabenstellung 2 mit höherer Komplexität bearbeitet hat, überlegt sich schon sehr früh bei der Analyse der physikalischen Inhalte, welches grundsätzliche Messdesign sie nutzen möchte (mehrere Messreihen, um den Einfluss von V_{pp} zu kontrollieren), indem sie die Anzahl der zu absolvierenden Messreihen mit systematischer Variation der Variablen festlegt. Sie leitet den finalen Messplan ab, nachdem sie den Inhalt und die Komponenten des experimentellen Setups analysiert sowie nachdem sie den gesamten Aufbau systematisch getestet hat. Sie legt die Messbereiche basierend auf Überlegungen, die sie an anderer Stelle gewonnen hat, bzw. die sich auch anderen Facetten zuordnen lassen. Sie passt die Messbereiche auf die Leistungsgrenzen der Spule, des Widerstandes und des Multimeters an. Weiterhin nutzt sie für die Festlegung der Messbereiche die Erkenntnisse aus dem Testen des Aufbaus, dass das Multimeter ab einem bestimmen Frequenzbereich automatisch in den nächsten Messbereich wechselt (damit ändert sich deren Innenwiderstand, was die Messungen beeinflusst) und dass die

Messwerte unterhalb von 20 Hertz stark schwanken. Bei 20 Hertz schwanken die Messwerte nur noch in der letzten Stelle, was für sie anscheinend als annehmbar eingeschätzt wird. Als Messschritte legt sie äquidistante Schritte von 2 Volt fest. Nach der Aufnahme und Schnellauswertung der ersten Messreihe passt sie die Schrittweite an, indem sie bis 50 Hertz (interessanter Teil des Signalverlaufs für die Beantwortung der Fragestellung) kleinere Schrittweiten misst. Die Anzahl der restlichen Messwerte von 50 bis 200 Hertz reduziert sie deutlich. Sie achtet nicht darauf die Frequenzen exakt einzustellen, was darauf zurückzuführen ist, dass dies für die Verarbeitung der Messdaten (Messwertepaare) nicht relevant ist.

Das Ableiten des Messplans durch **Lea** wird von mehreren Wissensressourcen strukturiert. Sie nutzt *technische*, *physikalische* und *fachmethodische Wissensressourcen*, indem sie die Erkenntnisse, die sich mehreren Facetten bzw. Subfacetten zuordnen lassen, miteinander in Beziehung setzt und sie damit für den weiteren Verlauf der Bearbeitung der Fragestellung nutzbar macht. Das Vernetzen der einzelnen Wissensressourcen wird daran deutlich, dass sie, nachdem sie das grundsätzliche Messdesign festgelegt hat, für die Präzisierung dieses die einzelnen Komponenten und auch das gesamte experimentelle Setup systematisch analysiert. Sie weiß *fachmethodisch*, dass alle Komponenten des experimentellen Systems die Qualität der Messergebnisse bedingen und deren Einfluss sowie Zusammenspiel somit hinsichtlich der Potenziale und Limitationen umfangreich geprüft werden müssen. Die Prüfung der Komponenten erfolgt systematisch (fachmethodische Wissensressource) und unter Nutzung technischer Wissensressourcen (Leistungsgrenzen, Toleranzbereiche und Funktionsweise unterschiedlicher Materialien und Geräte). Diese systematischen Analysen des Gesamtsystems geschehen unter Einbezug *physikalischer* Wissensressourcen, indem die Passung der Erkenntnisse zum theoretischen Signalverlauf und funktionalen Zusammenhang regelmäßig überprüft wird. Sie vernetzt folglich nicht nur einzelne Wissensressourcen miteinander, sondern auch Handlungen, die unterschiedlichen Facetten zuzuordnen sind, über den Gesamtprozesses hinweg. Dies zeigt sich auch in ihrem iterativen Prozessmuster. Für **Lea** scheint dementsprechend handlungsleitend zu sein, eine möglichst hohe Vernetzung zwischen den Wissensressourcen und den experimentellen Handlungen im Gesamtprozess zu erreichen. Der rekonstruierte Orientierungsrahmen, der auch bei **Horst** (Experte, weniger komplexe Aufgabenstellung) auftritt, kann dementsprechend als *systemisch* benannt werden.

Antonia analysiert bei der experimentellen Aufgabenstellung 2 mit höherer Komplexität den physikalischen Inhalt (Analyse des funktionalen Zusammenhangs) und die Messgeräte vor dem Ableiten des Messplans und hat vorher einzelne Bestandteile des experimentellen Setups getestet (Multimeter). Sie legt den Messbereich auf Basis der Funktionsweise der Multimeter von 10 bis 200 Hertz fest. Die untere Grenze wird aufgrund des Schwankens der Messwerte gewählt, wobei sie den Messbereich großzügiger auswählt als Lea. Die Messwerte schwanken in der zweiten Stelle. Die Messschritte werden abhängig vom theoretisch erwarteten

Signalverlauf festgelegt. Sie misst von 10 bis 40 Hertz in 2 Hertz Schritten und erhöht danach die Schrittweite auf 5 Hertz (50 bis 100 Hertz) und auf 10 Hertz (100 bis 200 Hertz). Nach der Aufnahme der Messdaten der ersten Messreihe wird die Anzahl der Messpunkte deutlich verringert, indem sie von 50 bis 200 Hertz in 10 Hertz-Schritten misst. Sie gibt sich sehr viel Mühe beim Einstellen der abhängigen Variable, was deutlich macht, dass sie das Konzept *Messwertpaare* nicht verstanden hat.

Antonia, die gerade mit ihrer Promotion begonnen hat, nutzt, wie **Lea**, Erkenntnisse aus den vier Facetten sowie die drei Wissensressourcen. Sie hat allerdings deutlich weniger Aspekte analysiert und getestet als **Lea**. Sie nutzt die gleichen Wissensressourcen (fachmethodisch, technisch, physikalisch), stellt jedoch weniger Vernetzungen zwischen allen Handlungen im Gesamtprozess her. Dies wird u. a. daran deutlich, dass sie sich nicht zuerst ein Messdesign überlegt und dementsprechend deutlich weniger Daten aufgenommen hat. Sie hat deswegen auch nicht wie **Lea** den Einfluss vom $V_{peak-peak}$ auf ihre Messdaten und -ergebnisse untersucht. Weiterhin hat sie ihre Bauteile nicht analysiert und getestet, sondern lediglich ihr Multimeter. Sie nahm weniger Referenzwerte für die Einordnung und Beurteilung ihrer Messergebnisse auf. **Antonia** nutzt dementsprechend die gleichen experimentellen Performanzelemente wie **Lea**, jedoch analysiert sie weniger Aspekte und weist einen geringeren Vernetzungsgrad innerhalb des Gesamtprozesses auf. Der Orientierungsrahmen der sinngenetischen Typik *Vernetzungsgrad*, den **Antonia** hier zeigt, kann als *mehrdimensional im Prozess* charakterisiert werden.

Adrian bearbeitet die Aufgabenstellung 1 mit der niedrigeren Komplexität. Er klärt zunächst sehr ausführlich die für das Experiment relevanten physikalischen Inhalte (Formeln und Zusammenhänge), welche Variablen er variieren und messen möchte sowie die relevanten Schaltpläne. Er legt, wie **Lea**, ein Messdesign fest und ist damit der einzige studentische Proband in der Stichprobe, der dies tut. Er durchdenkt die Größenordnungen und Leistungsgrenzen der Experimentiermaterialien und wählt passend zur Fragestellung die Geräte (Multimeter (Präzision) und Spannungsquelle (Einstellmöglichkeiten)) aus. Er schätzt weiterhin den Einfluss des Innenwiderstandes der Multimeter ab, nutzt diese Erkenntnis jedoch nicht im weiteren Verlauf. Er testet die Geräte nur einmalig mittels Anschalten. Er legt schriftlich keinen Messplan fest. Dieser wird dementsprechend aus den gezeigten Handlungen rekonstruiert. Er nimmt vier Messreihen auf (zwei pro Widerstand: einmal strom- und einmal spannungsrichtig) mit einmal 8, einmal 15 und zweimal 20 Messwerten. Als Messintervall legt er Ein-Volt-Schritte fest. Während des Experimentierens wechselt er in unterschiedlichen Messreihen, welche Variable er misst und welche er variiert. Er notiert sich dazu, dass er beim stromrichtigen Messen die Spannung variiert und beim spannungsrichtigen Messen die Stromstärke. Er besitzt hier also eine Fehlvorstellung zur Messmethodik und hat die Logik des Aufnehmens von Messwertpaaren noch nicht durchdrungen. Dies wird auch daran deutlich, dass er sehr viel Zeit darauf verwendet, die Variablen

möglichst genau einzustellen.

Adrian weiß *fachmethodisch*, dass er innerhalb des Messsystems alle Komponenten analysieren muss. Er durchdenkt die einzelnen Komponenten auch umfangreich unter Nutzung seiner *technischen* Wissensressourcen. Eine systemische Analyse des Zusammenspiels der Komponenten findet jedoch nicht statt. Weiterhin kann er dabei die physikalischen Wissensressourcen noch nicht sehr elaboriert mit einbeziehen, was u. a. daran deutlich wird, dass ihm nicht bewusst ist, wie sein Signalverlauf als Strom-Spannungskennlinie entsteht (Aufnahme von Messwertpaaren). Insgesamt zeigt sich bei Adrian, dass er die grundsätzlichen experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten besitzt, diese jedoch noch nicht funktional für die Vernetzung der einzelnen Arbeitsschritte im Gesamtprozess sind. Adrians Orientierungsrahmen in der sinngenetischen Typik *Vernetzungsgrad* ist dementsprechend als *mehrdimensional innerhalb einzelner Facetten* zu charakterisieren.

Piet bearbeitet die weniger komplexe Aufgabenstellung 1 und notiert sich zu Beginn nur den funktionalen Zusammenhang des physikalischen Phänomens und beginnt danach sofort mit dem Aufbau des Experimentes. Er analysiert die Komponenten des experimentellen Setups nicht, sondern wählt die, die er kennt. Er testet seinen Aufbau zunächst auf Sichtebene, indem er mit dem Finger den Kabelverläufen folgt und schaltet danach das Setup einmalig an, um zu sehen, ob ein Wert angezeigt wird. Er legt als Messbereich 1 bis 10 Volt ohne Begründung für beide Widerstände (10Ω und 2MΩ) identisch fest. Als Messschritte stellt er 1 Volt-Schritte ein. Er nimmt 10 Messwerte innerhalb der zwei Messreihen über den gesamten Messbereich verteilt auf. Er gibt sich sehr viel Mühe beim Einstellen der abhängigen Variable. Während der ersten Messreihe überschreitet er beim Widerstand (10Ω) die Leistungsgrenze. Er bemerkt einen verbrannten Geruch, nimmt aber noch zwei weitere Messwerte auf, weil der Widerstand noch funktioniert. Er passt daraufhin den Messbereich für den zweiten Widerstand (2Ω) auf 0 bis 5 Volt an. Er kann jedoch in dem Spannungsbereich aufgrund des hohen Widerstandswertes keine Messwerte aufnehmen. Er misst daraufhin den Widerstandswert des Widerstandes mit einem Multimeter nach und legt daraufhin den Messbereich auf 5 bis 10 Volt fest. Dieser Messbereich ist immer noch deutlich zu klein. Der zweite Widerstand erreicht die Leistungsgrenze erst bei 50 Volt, was nicht durchdacht wurde. Stattdessen ist die Leistungsgrenze des kleineren Widerstandes aus der ersten Messreihe ohne weiteres Durchdenken verwendet worden.

Bei **Piet** wird deutlich, dass er nicht alle drei Wissensressourcen (fachmethodisch, technisch und physikalisch) bei der Ableitung des Messplans verwendet. Er scheint die fachmethodischen Schritte für die Ableitung eines Messplans zu wissen, kann diese jedoch nicht fundiert ausführen. Vielmehr scheint bei ihm die experimentelle Fähigkeit ähnlich wie eine Checkliste vorzuliegen, welche er schrittweise abarbeitet. Er kann diese allerdings nur mit eher faustregelartigen (z. B. 10 Messwerte

Facette	Lea	Antonia	Adrian	Piet
Inhalte klären	• Größenordnung der Messwerte • interessante Punkte im Signalverlauf	• interessante Punkte im Signalverlauf	• Größenordnung der Messwerte	
Komponenten auswählen	• Begrenzung der Messgeräte • Leistungsgrenzen der Komponenten und Geräte • Größenordnung Komponenten	• Begrenzung der Messgeräte	• Begrenzung der Messgeräte • Leistungsgrenzen der Komponenten und Geräte • Größenordnung Komponenten	• *Größenordnung Komponenten*
Experimentelles Setup testen	• Automatische Messbereichswahl • Schwanken der Messwerte	• Schwanken der Messwerte		
Messergebnis beurteilen	• Anpassung des Messplans nach Beurteilung der Qualität des Ergebnisses	• Anpassung des Messplans nach Beurteilung der Qualität des Ergebnisses		
Orientierungsrahmen	systemisch	mehrdimensional im Prozess	mehrdimensional innerhalb Facette(n)	eindimensional

Abb. 22: In der Abbildung werden vergleichend die für die Ableitung des Messplans genutzten Erkenntnisse aus dem Experimentierprozess dargestellt. Die kursive Schriftart zeigt an, dass diese Erkenntnis zwar Einfluss besitzt, aber nicht korrekt genutzt wurde.

reichen für eine graphische Auswertung mittels Regression aus) bzw. generischen Wissensressourcen (äquidistante Messschritte sind systematisch) ohne weitere Verknüpfung zur Fragestellung oder zu dem Gesamtprozess füllen. Am Fall von Piet ist dadurch, dass er durch nicht messbare Widerstände gezwungen wurde, seinen Messplan noch einmal zu durchdenken, deutlich geworden, dass er durchaus in der Lage ist differenzierter zu arbeiten, d. h. eine eindimensionale Vernetzung mit einer anderen Erkenntnis (Widerstandsgrößenordnung/technisches Wissen) herzustellen, wenn es notwendig ist. Der Orientierungsrahmen, für den Piet hier beispielhaft ausgewählt wurde, ist dementsprechend als *eindimensional*, also eher oberflächlich, zu charakterisieren. Der Vernetzungsgrad über den Gesamtprozess hinweg ist niedrig, und er nutzt auch nicht die drei Wissensressourcen, die bei den bisherigen Fällen handlungsleitend waren.

In der Abbildung 22 sind die von den Proband:innen bei der Ableitung des Messplans genutzten Erkenntnisse, gruppiert nach den jeweiligen Facetten, vergleichend dargestellt.

9.3.2.2. Sinngenetische Typik 2 - Zielorientierung

Die rekonstruierte Typik *Vernetzungsgrad* zeigt, dass die Proband:innen hinsichtlich der Nutzung unterschiedlicher Wissensressourcen sowie in der Vernetzung der einzelnen Handlungen über den gesamten Experimentierprozess hinweg unterscheidbar sind. Weiterhin konnten erste Hinweise gefunden werden, inwiefern der Expertisegrad mit dem jeweiligen Prozessmuster der Proband:innen zusammenhängen könnte. Weitere Hinweise dazu liefert die zweite sinngenetische Typik *Zielorientierung*. Dazu ist anhand der Performanz analysiert worden, was für die Proband:innen über den gesamten Experimentierprozess hinweg handlungsleitend ist. Es konnten fünf Orientierungsrahmen, die über alle Fälle tragfähig und in der sinngenetischen Typik *Zielorientierung* systematisierbar sind, mittels kontrastiver Vergleiche rekonstruiert werden. Aufgrund der hohen Komplexität der Fälle sowie der Orientierungsrahmen, die sich auf den gesamten Prozess beziehen, werden die Orientierungsrahmen im Folgenden nur ausschnittweise anhand ausgewählter Proband:innen illustriert.

Die *Zielorientierung*, die einem Prozess zugrunde liegt, stellt einen komplexen kognitiven Prozess dar, der sowohl über fachliche und methodische aber auch metakognitive Strategien strukturiert wird. Die Orientierungsrahmen, die der Typik *Zielorientierung* zugeordnet werden, beziehen sich darauf, welcher zugrunde liegender Aspekt die Handlungen über den Gesamtprozess strukturiert. Dazu ist analysiert worden, welches grundsätzliche Ziel die Proband:innen beim Experimentieren verfolgen und wie kontrolliert dieses Ziel erreicht wird, um diese implizite Handlungslogik anhand der getätigten Handlungen rekonstruieren zu können. Zur Reduktion der möglichen Analyseszenarien werden im Folgenden ausgewählte *chronologische Fallstudien* anhand zweier neuralgischer Zeitpunkte vorgestellt. Erstens anhand der Analyse des strategischen Vorgehens der Proband:innen zu Beginn des Experimentes. An diesem Punkt müssen sich die Proband:innen hinsichtlich des Problems orientieren, den Problemtyp der Fragestellung analysieren und die Inhalte des Experimentes klären. Zweitens soll die abschließende Beurteilung des Experimentes analysiert werden, um zu überprüfen, wie stringent die Proband:innen die geplanten Handlungen über den Gesamtprozess durchgeführt haben und welche strategischen Unterschiede in Bezug auf die *Zielorientierung* bei der Handlungssteuerung hinsichtlich der Argumentationslinie beim Experimentieren rekonstruiert werden können.

Die Orientierungsrahmen werden zunächst anhand von Einzelfallstudien und dann durch Vergleiche unter Nutzung folgender Proband:innen vorgestellt: **Lea** (Expertin), **Piet** und **Mia** (Gruppe 3, traditionelles Praktikum) sowie **Ina** und **Adrian** (Gruppe 2, fachmethodisches Praktikum).[72]

[72] Hier muss wiederum angemerkt werden, dass die einzelnen Orientierungsrahmen sich nicht ausschließlich auf die ausgewählten Personen beschränken. Die Proband:innen dienen nur zur Illustration der Erkenntnislogik.

Lea (komplexere Aufgabenstellung 2, Kap. 9.1.2.1) fokussiert sich zu Beginn des Experiments zunächst auf die Analyse des Problems. Sie analysiert die Fragestellung sehr detailliert und notiert sich erste Gedanken zur Zielsetzung des Experimentes (*Frequenzabhängigkeit?*). Sie notiert sich weiterhin sofort Spezifika ihrer Experimentiermaterialien (Größenordnung Induktivität, Toleranzgrenze der Spule, Innenwiderstand Frequenzgenerator...), die sie durch das Lesen von Datenblättern im Internet zusammensucht. Im nächsten Schritt markiert sie sich beim funktionalen Zusammenhang, welche Parameter durch das Fitten (wurzelförmig) bestimmt werden und welche konstant sind. Im Anschluss skizziert sie den theoretisch vermuteten Signalverlauf und notiert sich, welche Messreihen sie aufnehmen möchte. Während sie diese Schritte der Problemanalyse absolviert, analysiert sie immer wieder die einzelnen Experimentiermaterialien und differenziert im Anschluss Teile ihrer Planung aus. Sie braucht für diese Schritte insgesamt 22 min. Das Experiment führt sie nach zu Beginn festgelegtem Plan durch. Sie notiert sich sehr differenziert alle möglichen Erkenntnisse und Gedankengänge im Laborjournal, die ggf. noch relevant sein könnten. Weiterhin analysiert sie mittels systematischer Testmessungen der einzelnen Teile des Setups sowie des gesamten Setups ihr experimentelles Setup sehr ausgiebig hinsichtlich möglicher Limitationen und möglicher zu kontrollierender Einflüsse. Sie beantwortet den methodischen Teil der Fragestellung (Genauigkeit von fünf signifikante Stellen erreichen) schon nach der Analyse der Messgeräte. Den inhaltlichen Teil der Fragestellung beantwortet sie auf Basis mehrerer Erkenntnisse: Sie vergleicht ihr Ergebnis mit dem zu Beginn ermittelten Referenzwert, den theoretischen Überlegungen zum Signalverlauf und durch die Analyse der Fitparameter im Rahmen der Messunsicherheit (quantitative und qualitative Unsicherheiten). Für das gesamte Experiment beurteilt sie sehr differenziert die Limitationen des Experimentes auf drei Ebenen: Experimentelle Realisierung, Datenaufnahme und Auswertung. Sie schlägt passgenaue Optimierungen vor, um die Qualität der Messdaten zu erhöhen.

Adrian beginnt die Bearbeitung der weniger komplexen Aufgabenstellung 1 mit dem Lesen der Aufgabenstellung und des Fachwissenstextes. Er notiert sich auf mehr als einer Din A4 Seite die für das Experiment relevanten physikalischen Inhalte (Formeln und Zusammenhänge), welche Variablen er variieren und messen möchte sowie die relevanten Schaltpläne. Er beginnt dann mit dem Zusammenstecken seines ersten experimentellen Setups. Er wählt die Messgeräte, die er schon im Praktikum genutzt hat und dementsprechend kennt. Die Widerstände und auch Spezifika der Messgeräte, die einen Einfluss auf die Messung haben, werden analysiert, jedoch im weiteren Verlauf nicht weiter beachtet. Die experimentellen Setups werden einmalig angeschaltet und überprüft, ob ein Wert angezeigt wird. Eine systematische Analyse des Setups hinsichtlich möglicher Limitationen findet nicht statt. Er braucht für diesen Teil 80 Minuten. Er nimmt für vier Messreihen Messwerte auf, um die inhaltliche Fragestellung (Welcher Aufbau ist präziser für zwei unterschiedliche Experimentiermaterialien) beantworten

zu können. Er ist der einzige der Proband:innen, der ein geeignetes Setting für die Beantwortung der Fragestellung gewählt hat. Die methodische Fragestellung (Genauigkeit von fünf signifikanten Stellen) wird nicht beantwortet. Er vergleicht seine Ergebnisse mit experimentell bestimmten Referenzwerten im Rahmen der Messunsicherheit. Es wird erkannt, dass die Ergebnisse deutlich von den theoretischen Vorüberlegungen abweichen. Es werden keine Begründungen dafür angegeben. Es ist dementsprechend nicht erkannt worden, dass dies aufgrund diverser messmethodischer Fehler bei der Datenaufnahme geschehen ist. Die Fitparameter werden im Rahmen der Messunsicherheit analysiert. Im Laborjournal werden bis auf Beobachtungen während des Experimentes hinsichtlich möglicher noch nicht quantifizierter Messeinflüsse alle wichtigen Erkenntnisse notiert. Gedankengänge zum Experiment (Ideen für die Auswertung, mögliche, nicht eindeutig identifizierbare Limitationen, ...) sind nicht enthalten. Er würde bei nochmaliger Durchführung bessere Krokodilklemmen und weniger bzw. kürzere Kabel wählen. Er beurteilt die Qualität seines Experimentes folglich nur auf Detailebene und somit eher pauschal.

Ina klärt für die Bearbeitung der komplexeren Aufgabenstellung 2 zunächst den physikalischen Inhalt, indem sie sich alle Formeln aus dem Fachwissenstext notiert. Sie wählt die Messgeräte aus, die sie kennt und analysiert die restlichen Komponenten nicht. Sie testet ihr experimentelles Setup nicht, sondern überprüft nur auf Sichtebene, ob alle Kabelverbindungen korrekt sind. Sie legt den Messplan ohne weitere Begründung auf den Messbereich von 10 bis 80 Hertz fest. Sie benötigt für diese Schritte 54 Minuten. Nach dem Aufnehmen der ersten Messreihe setzt sie ausgewählte Messwertpaare (drei) in den funktionalen Zusammenhang ein. Sie scheint noch einmal den physikalischen Inhalt zu überprüfen. Für die zweite Messreihe nimmt sie einen breiteren Messbereich (10-150 Hz) in 10 Hertz-Schritten auf. Es ist unklar, warum dieser Messbereich und die äquidistanten Schrittweiten über den gesamten Messbereich festgelegt wurden. Sie notiert sich, dass die Messwerte in einem bestimmten Bereich schwanken und streicht diese Messwerte durch. Ina bestimmt anhand ihrer Daten am Ende ein Ergebnis, das 55% relative Abweichung zum Referenzwert besitzt. Sie selbst hat diesen Vergleich nicht gemacht, da sie den Referenzwert nicht bei der Analyse der Komponenten gemessen hat. Stattdessen gleicht sie den gemessenen Signalverlauf mit dem theoretisch erwarteten Verlauf ab und schätzt ihr Ergebnis als zufriedenstellend ein. Sie identifiziert bei der Analyse der Fitparameter eine systematische Abweichung, die sie in der Messung oder bei der Berechnung des Scheinwiderstandes vermutet. Sie merkt an, das die Fragestellung nicht beantwortet werden kann, weil "kein vertretbares Ergebnis erzielt wurde" und somit eine schlechte Güte vorliege. Bei der Beurteilung des Experimentes führt sie an, dass sie bei nochmaliger Durchführung das Wackeln am Tisch vermeiden will und direkt die Stromstärke messen würde, um nicht den Umweg über die Spannungsmessung zu gehen. Die für die Güte relevanten limitierenden Faktoren (Messplan, Messmethodik, Gerätewahl, ...) werden nicht genannt. Im Laborjournal sind neben den Formeln, Schaltplänen,

quantitativen und qualitativen Daten auch Gedanken bzw. Ideen zum Experiment notiert worden.

Piet beginnt die Bearbeitung der weniger komplexen Aufgabenstellung 1, indem er sich die relevante Formel notiert und ohne weitere Begründung festlegt, dass er stromrichtig messen möchte. Dies ist sowohl inhaltlich als auch messmethodisch nicht korrekt. Er wählt die Geräte, die er aus dem Praktikum kennt und beginnt mit der Messwertaufnahme. Er benötigt für diese Schritte 11:30 min. Nachdem er beim zweiten Widerstand (2MΩ) keine Messwerte mit dem gewählten Messplan erhält, bestimmt er die Größenordnung des Widerstandes und kann basierend auf der Analyse den Messplan anpassen und weiter experimentieren. Er führt das Experiment weiter durch und bestimmt mittels linearen Fits die Größenordnungen der unbekannten Widerstände ohne Einbezug von Messunsicherheiten. Er schätzt seine Ergebnisse negativ ein und glaubt nicht, dass sich die Aufbauten für eine möglichst präzise Bestimmung der Widerstände eignen. Eine Begründung führt er nicht an. Er merkt an, dass die beiden Widerstände zu groß bzw. zu klein für die experimentellen Setups seien. Als Optimierungen führt er an, dass mehr Messwerte pro Messreihe aufgenommen werden müssen und dass sowohl spannungs- als auch stromrichtig gemessen werden sollte, damit die Innenwiderstände der Messgeräte berücksichtigt werden können. Im Laborjournal sind die Formel für das Ohmsche Gesetz, die Messdaten und die Ergebnisse notiert worden.

Mia beginnt die Bearbeitung der komplexeren Aufgabenstellung 2, in dem sie zunächst die Fragestellung wortwörtlich im Internet sucht. Sie wird jedoch nicht fündig. Im Anschluss liest sie auf unterschiedlichen Internetseiten Informationen zum Thema *Spannungsmessung*, *Spule* und *Multimeter verwenden* nach. Sie sieht sich die Materialien an und baut diese zusammen. Sie nutzt die Multimeter, die sie schon kennt. Sie stellt eine Frequenz ein, erhält einen Wert, setzt diesen ins Ohmsche Gesetz ein und durchdenkt die abgelesenen Messwerte hinsichtlich ihrer Plausibilität. Sie sucht wieder im Internet nach *Multimeter verwenden*. Für diese Schritte benötigt sie 61 min. Nach mehreren gescheiterten Versuchen, das Experiment richtig zusammenzubauen, zu verwenden und auszuwerten, nimmt sie das Messwertpaar aus der ersten Testmessung und setzt es in eine Formel (hinsichtlich der Komplexität deutlich reduziert, jedoch fachlich korrekt) ein, die sie im Internet gefunden hat. Danach bricht sie das Experiment ab, weil sie keine Ideen mehr hat, was sie noch machen könnte. Sie vermutet, dass sie an dem Experiment gescheitert ist, weil sie den Frequenzgenerator nicht korrekt bedient hat. Mias Laborjournal beinhaltet Formeln, Schaltpläne und quantitative Messdaten.

Im Folgenden werden die Proband:innen miteinander verglichen, um die jeweiligen Orientierungsrahmen präzisieren zu können.

Lea bearbeitet die experimentelle Aufgabenstellung systematisch und differen-

ziert. Ihre Handlungen sind darauf ausgerichtet den für die Beantwortung der Fragestellung zu untersuchenden Signalverlauf möglichst präzise herauszuarbeiten und bestmöglich hinsichtlich der Güte zu analysieren und zu beurteilen. Dies zeigt sich u. a. an dem sehr iterativen Prozessverlauf. Sie gleicht die vorhandenen Materialien, ihre geplanten Schritte ständig mit dem physikalischen Inhalt ab und legt so schrittweise die bestmögliche Realisierung des Experimentes fest. Ihre Problemanalyse und -repräsentation ist dementsprechend sehr komplex und differenziert. Verglichen mit den anderen vier Fallstudien ist in dieser Phase nur noch **Piet** schneller als sie. Dieser hat jedoch bei weitem nicht die Anzahl an Handlungen und Kontrollschritten in der Zeitspanne durchlaufen. **Lea** legt weiterhin ein Messdesign fest, das deutlich auf Reproduzierbarkeit ausgelegt ist. Sie nimmt fünf Messreihen auf, und analysiert bei der Auswertung, ob die eingestellte Spannung (V_{pp}) einen Einfluss auf das Messergebnis besitzt. Außer ihr haben dies auch noch **Elisa** und **Irmgard** gemacht. Weiterhin ist auffällig, dass Lea während des gesamten Prozesses die Limitationen des experimentellen Setups durchdenkt und sehr sorgfältig dokumentiert. Sie nutzt weiterhin für die Quantifizierung qualitativer Messdaten geeignete Strategien (*educated guess*: Abschätzen auf Basis bekannter Größenordnungen). Dementsprechend umfassend und fundiert ist ihre Beurteilung des Messergebnisses und des Experimentes. Als handlungsleitend können in diesem Orientierungsrahmen dementsprechend die Herstellung der Signalstabilität, die Sicherstellung der Reproduzierbarkeit durch umfassende und sorgfältige Dokumentation sowie das Durchdenken der Qualität der Messergebnisse (Limitationen und Geltungsbereich) identifiziert werden. Die Sicherstellung der Reproduzierbarkeit stellt eine handlungsstrukturierende Metastrategie über den Gesamtprozess dar. Die Handlungsstrukturierung erfolgt über diverse Kontrollschleifen und Plausibilitätsüberprüfungen der einzelnen Handlungen und Aspekte des experimentellen Setups, wodurch eine umfassende Beurteilung der Güte der experimentellen Daten ermöglicht wird. Diese Strategie zur Selbstüberwachung während des Experimentierprozesses erfolgt demnach nach den Hauptprinzipien von Wissenschaft (Prinzipien zur Sicherstellung der Reproduzierbarkeit). Die Fachspezifität wird innerhalb dieses konzeptuellen kognitiven Rahmens durch die Ausgestaltung der einzelnen Kontroll- und Plausibilitätsüberprüfungen beim Herausarbeiten einer Signalstabilität auf Basis von methodischen, physikalischen und technischen Wissensressourcen realisiert. **Lea** ist bei der gesamten Bearbeitung der experimentellen Aufgabe auf den Prozess fokussiert. Ihr Orientierungsrahmen in der Typik *Zielorientierung* kann dementsprechend als *prozessorientiert* charakterisiert werden.

Anders als bei **Lea**, bei der beim Prozess die Reproduzierbarkeit sowie die Beurteilung der Güte im Vordergrund stehen, ist der Orientierungsrahmen von **Piet** als *ergebnisorientiert* zu charakterisieren. Bei ihm wirkt während des gesamten Experimentierprozesses die erfolgreiche Generierung eines Zahlenwertes handlungsleitend. Dies wird dadurch deutlich, dass er den Problemtyp (Fragestellung), den physikalischen Zusammenhang sowie die Bestandteile des experimentellen

Setups nicht tiefgehend analysiert und auch kaum Vernetzungen zwischen den experimentellen Handlungsmustern herstellt. Dies wird auch durch sein lineares Prozessmuster sowie durch die kurze Zeitspanne, die er am Anfang für die Gestaltung der experimentellen Untersuchung verwendet, unterstrichen. Erst in dem Moment, als ihm bewusst wird, dass diese Strategie nicht mehr funktional ist (Bestimmung des zweiten Widerstandes), ändert er kurzfristig diese Vorgehensweise. Nach dem Lösen der Herausforderung fällt er jedoch wieder in die *Ergebnisorientierung* zurück. Er durchdenkt keinerlei Limitationen und überprüft seine Messergebnisse nicht hinsichtlich ihrer Qualität und Aussagekraft. Vielmehr beantwortet er die Fragestellung auf Basis "gefühlter" Gründe (Widerstände sind zu groß/klein), was physikalisch, technisch und auch messmethodisch nicht korrekt ist. In diesem Orientierungsrahmen scheint keine durch physikspezifische Wissensressourcen strukturierte Metastrategie vorzuliegen. Es ist eher so, dass er sein Vorgehen erfahrungsbasiert strukturiert, was daran zu erkennen ist, dass er sich an pauschalen Merkmalen (Zahlenwert) orientiert. Dies ist vermutlich noch vom Experimentieren aus der Schulzeit bekannt, wo ebenfalls eher der Zahlenwert bzw. die qualitative Beobachtung eines Phänomens und nicht der Prozess der Untersuchung bzw. die Kontrolle dessen im Vordergrund stehen. Er kann die grundsätzlichen Schritte eines Experimentes im Sinne eines Schemas jedoch ohne übergeordnetes Konzept durchlaufen. Dementsprechend fehlen ihm für die Performanz funktionale Wissensressourcen im Bereich des Wissenschaftsverständnisses (z. B. Gültigkeit und Absicherung von Erkenntnissen).

Mia scheint im Vergleich zu **Piet** zusätzlich noch ein Defizit im Bereich der fachlichen Wissensressourcen aufzuweisen, weswegen ihr Orientierungsrahmen als *generisch* zu charakterisieren ist. Dies zeigt sich z. B. darin, dass sie, statt sich mit dem Experiment zu beschäftigen, den vollständigen Wortlaut der Fragestellung im Internet sucht und auch hier nicht in der Lage ist, unterschiedliche Kombinationen von Schlagworten zu nutzen, um die gewünschte Information zu erhalten. Weiterhin ist sie nicht in der Lage, den relevanten funktionalen Zusammenhang zu analysieren und daraus abzuleiten, welche Variablen gemessen werden müssen. Auch stellen das grundsätzliche Aufbauen eines experimentellen Setups sowie grundlegende experimentelle Fähigkeiten und Fertigkeiten, wie das Messen von Variablen, eine Herausforderung dar. Das handlungssteuernde Element dieses Orientierungsrahmens ist aufgrund der fehlenden fachspezifischen Wissens- und Strategieressourcen dementsprechend als *ausprobierend* zu charakterisieren, was eine typische generische Strategie von Noviz:innen darstellt (Shavelson, Solano-Flores und Ruiz-Primo 1998, Klahr und Dunbar 1988). Mias Fall zeigt deutlich, dass die typischen Prozessmuster nicht alleinig als Indikator für Kompetenzausprägungen genutzt werden können. Ihr Prozessmuster gestaltete sich ähnlich wie das der Expert:in **Lea**, beinhaltet jedoch keine qualitativ hochwertigen Aspekte experimenteller Fähigkeiten und Fertigkeiten.

Die Orientierungsrahmen der Typik *Zielorientierung* von **Ina** und **Adrian** können

zwischen **Lea** und **Piet** eingeordnet werden. **Adrian** zeigt, dass er deutlich mehr messmethodische Wissensressourcen besitzt als **Piet**, diese jedoch eher im Sinne eines Rasters abgearbeitet werden und damit nicht flexibel anwendbar sind. Er analysiert sowohl die physikalischen Inhalte als auch die einzelnen Bestandteile seines Messsystems, jedoch sind diese Wissensressourcen nicht vollständig funktional für den Gesamtprozess. Dies zeigt sich auch daran, dass er, weil er mehr über die einzelnen Schritte nachdenken muss, deutlich länger als **Lea** für diese einzelnen Schritte benötigt. Weiterhin fließen die Aspekte, die analysiert werden, danach nicht, wie bei **Lea**, in die nächsten Schritte und in die Beurteilung des Ergebnisses ein. Dies zeigt sich z. B. daran, dass er das Ergebnis samt Messunsicherheiten bestimmt, die Abweichungen zum Referenzwert jedoch nur auf Detailebene (Krokodilklemmen) durchdenkt. Ihm ist es nicht möglich, an dieser Stelle Erkenntnisse, die er während des Experimentierens gesammelt hat, zur Beurteilung heranzuziehen. Dies ist auch auf fehlende Kontrollhandlungen und Plausibilitätsüberprüfungen bei der Analyse des Setups sowie der Datenaufnahme zurückzuführen. Adrian ist dementsprechend als *strukturorientiert* zu charakterisieren. Handlungsleitend für die Metastrategie dieses Orientierungsrahmens ist demnach das Abarbeiten gelernter Strukturen, jedoch sind die Wissensressourcen noch nicht adaptiv genug, um elaboriert den Prozess zu strukturieren. Er weiß jedoch, welche Schritte beim Experimentieren durchlaufen werden müssen und welche Rolle die Fragestellung für den Prozess spielt. Dies zeigt sich u. a. auch daran, dass er als einziger in der experimentellen Aufgabe 1 ein zur Fragestellung passendes Setup festgelegt und am Ende die Fragestellung fundiert beantwortet hat. Es wird auch deutlich, dass er die Wissensressourcen für die Bewältigung der Komplexität des Prozesses und für die Qualitätseinschätzung von Erkenntnissen grundsätzlich beherrscht. Beim Prozessmuster von Adrian zeigt sich, dass er aufgrund fehlender Optimierungs- und Testschleifen im Phasendiagramm einen eher linearen Prozessverlauf aufweist, der eher an **Piet** als an **Lea** erinnert.

Ein Vergleich von **Ina** mit **Adrian** zeigt, dass die von Ina genutzte Metastrategie weniger erfolgreich als die von **Adrian** ist. Sie zeigt durch fehlende Kontrollhandlungen und Plausibilitätsprüfungen bei der Realisierung des experimentellen Setups und auch bei der Messdatenaufnahme ein deutlich weniger elaboriertes Vorgehen als **Adrian**. Dies zeigt sich auch beim Beurteilen des Messergebnisses, bei dem zwar deutlich wird, dass das grundsätzliche wissenschaftliche Prinzip der *Einschätzung und Einordnung der Qualität von Messdaten* bekannt ist. Jedoch scheitert sie aufgrund weniger funktional vorliegender Wissensressourcen im Bereich der physikalischen, methodischen und technischen Wissensressourcen bei der Umsetzung. Dies zeigt sich sehr eindringlich bei der abschließenden Beurteilung des Ergebnisses und Experimentes. Sie führt am Ende des Experimentes nur typische von Student:innen im Rahmen des Laborpraktikums standardmäßig angeführten Optimierungen[73] ohne Bezug zum Experiment an. Ihre Wissensressourcen

[73] Erfahrungsbasiert werden von Student:innen in den ersten Semestern zusätzlich zu den von Ina genannten Aspekten, *Vermeidung von Erschütterungen* und *automatisierte Messdatenerfassung*,

sind dementsprechend als wenig funktional für die experimentelle Performanz einzuschätzen. Als handlungsleitend für den Gesamtprozess fungiert die konzeptuelle Wissensressource der Einschätzung der Qualität von Messdaten, womit der Orientierungsrahmen als *qualitativ-orientiert* charakterisiert werden kann. *Qualitativ-orientiert* bedeutet hier, dass das Experiment nicht quantitativ, sondern auf Basis weniger (manchmal pauschaler) qualitativer Beobachtungen bewertet wird. *Qualitativ-orientiert* meint hier auch den Fokus auf Aspekte, denen alltäglich eine hohe Qualität zugeschrieben wird, wie gerade Zahlen, Sorgfalt, genaues Einstellen, alle angezeigten Nachkommastellen. In diesem Orientierungsrahmen wird also das übergeordnete Konzept der Disziplin fokussiert, ohne dass die für die Durchführung notwendigen Handlungsressourcen vorliegen. **Helmut** zeigt innerhalb seines Orientierungsrahmens eine ähnliche Tendenz. Er nimmt mehrere Referenzwerte während des Experimentierens auf, für die Beurteilung seines Messergebnisses nutzt er jedoch eine Fehlvorstellung in Bezug auf das Bauteil Widerstand. Er führt an, dass sein Ergebnis nicht plausibel ist, weil es eine Dezimalzahl und keine "ganze" Zahl ist. Seiner Meinung nach werden Bauteile, wie Widerstände, nur mit ganzzahligen Widerstandswerten produziert. **Adrian** zeigt ähnliche Tendenzen beim Aufnehmen seiner Messwerte. Er nimmt Messwertpaare auf, gibt sich jedoch sehr viel Mühe, die Variablen exakt auf eine Nachkommastelle einzustellen. Er korrigiert pro Messwert sehr häufig die eingestellte Spannung, da diese aufgrund des Einflusses des Setups nach dem Einstellen leicht schwankt. Hier wird deutlich, dass er qualitativ hochwertiges Experimentieren mit Exaktheit oder Sorgfalt verbindet. An dieser Stelle ist dies jedoch nicht erforderlich, da seine Variablen einem proportionalen Zusammenhang folgen und dementsprechend ein möglichst sorgfältiges Einstellen der Variablen keinen Einfluss auf die Aussagekraft des Ergebnisses besitzt. Weiterhin gibt er beim Endergebnis alle Werte und Unsicherheiten mit insgesamt acht Stellen an. Auch hier scheint ein falsches Konzept in Bezug auf die Qualität vorzuliegen, da das Prinzip *signifikante Stellen* anscheinend unbekannt ist. Bei diesen Aspekten ist **Adrian** dementsprechend ebenfalls als *qualitativ-orientiert* zu charakterisieren. Diese Aspekte sind bei ihm jedoch nicht, wie z. B. bei **Ina**, über den gesamten Prozess handlungsleitend, sondern beeinflussen nur einzelne Handlungen im Gesamtprozess.

9.3.3. Entwicklung der Facetten der Dimension *Qualitätsausprägung* - Relationale Typenbildung

Mittels des Analyseschritts der *reflektierenden Interpretation* konnten die rekonstruierten Orientierungsrahmen innerhalb der beiden sinngenetischer Typiken

typischerweise noch Optimierungen wie, *mehr Messdaten erfassen, um die Statistik zu verbessern* oder *Reibung* als Haupteinflussfaktoren für die Qualität von Messdaten angeführt. Diese stellen meist eher Alltagserfahrungen dar (wenn ich am Tisch wackele, beeinflusse ich alles, was auf dem Tisch steht) und haben oftmals wenig mit dem durchgeführten Experiment gemeinsam (vgl. hierzu auch Holz und Heinicke 2018, Heinicke 2012).

Vernetzungsgrad und *Zielorientierung* gebündelt werden.

Die Analyse aller Fälle zeigt, dass innerhalb einer *chronologischen Fallstudie* mehrere unterschiedliche *Orientierungsrahmen* rekonstruiert werden können. So weist ein Proband innerhalb der Typik *Vernetzungsgrad* z. B. in der einen Facette den Orientierungsrahmen *mehrdimensional im Prozess*, bei der nächsten Facette dann den Orientierungsrahmen *eindimensional* auf. Weiterhin ist deutlich geworden, dass die Orientierungsrahmen der beiden Typiken miteinander zusammenhängen. Über alle Proband:innen hinweg konnten Muster hinsichtlich des gemeinsamen Auftretens von *Orientierungsrahmen* bei beiden Typiken identifiziert werden. Aufgrund der nicht eindeutigen Zuordnungen der Orientierungsrahmen pro Fall sowie der identifizierten charakteristischen Zusammenhänge der Orientierungsrahmen über die Typiken hinweg konnte eine Bildung *relationaler Typiken*[74], die die Zusammenhänge zwischen den Typiken *Vernetzungsgrad* und *Zielorientierung* charakterisieren, durchgeführt werden (siehe Kap. 8.1). Es werden im Folgenden zunächst die Ergebnisse der *relationalen Typenbildung* vorgestellt. Diese stellen die Grundlage für die Systematisierung der Qualitätsstufen der Dimension *Qualitätsausprägung* dar (Kap. 9.3.3.1). Weiterhin werden induktiv herausgearbeitete, *handlungsorientierte Indikatoren* (Niveauindikatoren) vorgestellt. Diese Indikatoren ermöglichen innerhalb des Kompetenzstrukturmodells die Verknüpfung zwischen den beiden Dimensionen *Fachmethodik* (Performanz) und *Qualitätsausprägung* (kognitive Dispositionen) und somit einen Rückschluss auf die der Performanz zugrunde liegenden Dispositionen (Kap. 9.3.3.2).

9.3.3.1. Vorstellung der relationalen Typiken

Für die relationale Typenbildung werden die Zusammenhänge zwischen den beiden sinngenetischen Typiken, hier im Speziellen die Zusammenhänge zwischen den in den Typiken gebündelten *Orientierungsrahmen*, die die innere Logik der Performanz umfassen, rekonstruiert. Die Typiken *Vernetzungsgrad* und *Zielorientierung* adressieren jeweils verschiedene Ebenen des Prozesses. Während die Orientierungsrahmen der Typik *Vernetzungsgrad* auf Ebene der Einzelhandlungen die nächsten Schritte strukturieren, stellen die *Orientierungsrahmen* der Typik *Zielorientierung* den Rahmen dar innerhalb dessen der Gesamtprozess gesteuert wird. Beide Typiken zusammen umfassen die charakteristischen Merkmale des universitären Experimentierens unterschiedlich fähiger Proband:innen.

Mit Bezug zur Frage, welche Merkmale und Strukturen das universitäre Experimentieren von Expert:innen, also Könnern, charakterisieren, kann der Fall **Lea**

[74] Unter relationalen Typiken können charakteristisch verknüpfte Merkmale verstanden werden. In diesem Projekt sind damit Verknüpfungen zwischen den Orientierungsrahmen der sinngenetischen Typiken gemeint.

als Prototyp identifiziert werden. Die unter anderem anhand ihres Falles herausgearbeiteten *Orientierungsrahmen* zeigen, welche Performanz beim universitären Experimentieren erwartbar ist. Aufgrund dessen, dass die Komplexität der Aufgabenstellungen in keinster Weise mit Promotions- oder Postdoc-Projekten verglichen werden kann, kann das von ihr gezeigte Performanzniveau auch für die Beurteilung studentischer Performanz genutzt werden. Dies wird dadurch gestützt, dass einige Proband:innen (z. B. **Irmgard, Elisa, Hans**) gleiche bzw. sehr ähnliche *Orientierungsrahmen* schon im vierten Semester besitzen. **Lea** zeichnet aus, dass ihr Experimentierprozess zum einen durch drei stark vernetzte Wissensressourcen (fachinhaltlich, fachmethodisch und technisch) sowie zum anderen durch übergeordnete konzeptuelle Wissensressourcen (Metawissen) basierend auf den Prinzipien der Wissenschaft (Physik) (Reproduzierbarkeit, Einschätzung der Güte der Ergebnisse), strukturiert wird. Bei ihr liegt dementsprechend ein für die experimentelle Performanz funktionales Wissenschaftsverständnis, bestehend aus fachspezifischen Wissensressourcen sowie aus metakognitiven Wissensressourcen, vor. Ihr Fall deckt sich ebenfalls mit den herausgearbeiteten Charakteristika physikalischer Forschung (Kap. 2.1.1). Physiker:innen versuchen während eines interaktiven Stabilisierungsprozesses Kohärenz zwischen dem physikalischen Phänomen, den Geräten und Materialien sowie den eigenen Handlungen herzustellen (siehe Kap. 2.1.1). Das Ziel des Prozesses ist die Sicherstellung der Reproduzierbarkeit und hier im Besonderen die differenzierte Beurteilung der Güte der Ergebnisse vor dem Hintergrund der Rahmenbedingungen des Prozesses sowie damit verbunden die sehr sorgfältige Dokumentation des gesamten Prozesses. Es lässt sich somit nun die Abbildung 1 aus Kapitel 2.1.1 um die handlungssteuernden Wissensressourcen erweitern (Abb. 23).

Die weiteren rekonstruierten Orientierungsrahmen weisen eine Abstufung bzw. andere Ausprägung der beiden sinngenetischen Typiken auf. Zur besseren Passung der Typiken zur Forschungslandschaft wird bei der Benennung der *relationalen Typiken* auf das Konzept der *hierarchischen Komplexität* (siehe Kap. 2.5.2.4) zurückgegriffen. Anders als bei Kauertz (2008) oder Bernholt (2010) wird das Konzept hier nicht zur Festlegung aufgabenspezifischer schwierigkeitserzeugender Merkmale (a priori Modellierungsansatz) genutzt, sondern zur Stufung für die gezeigte Performanz und hier im Besonderen zur Stufung der Qualität der Performanz bezogen auf die kognitiven Aspekte *Vernetzungsgrad* und *Zielorientierung* genutzt.

Die Rekonstruktion über die *relationale Typenbildung* ergibt fünf Typiken, die aus jeweils zwei *Orientierungsrahmen* (einer je sinngenetischer Typik) bestehen. Die *relationalen Typiken* sind zusammen mit den in ihnen subsumierten Orientierungsrahmen in Abbildung 24 dargestellt und werden im Folgenden kurz charakterisiert.[75]

[75] Die ausführliche Zuordnung der Proband:innen zu den einzelnen Typiken erfolgt im Kap. 9.5.1 bei der Prüfung des Modells.

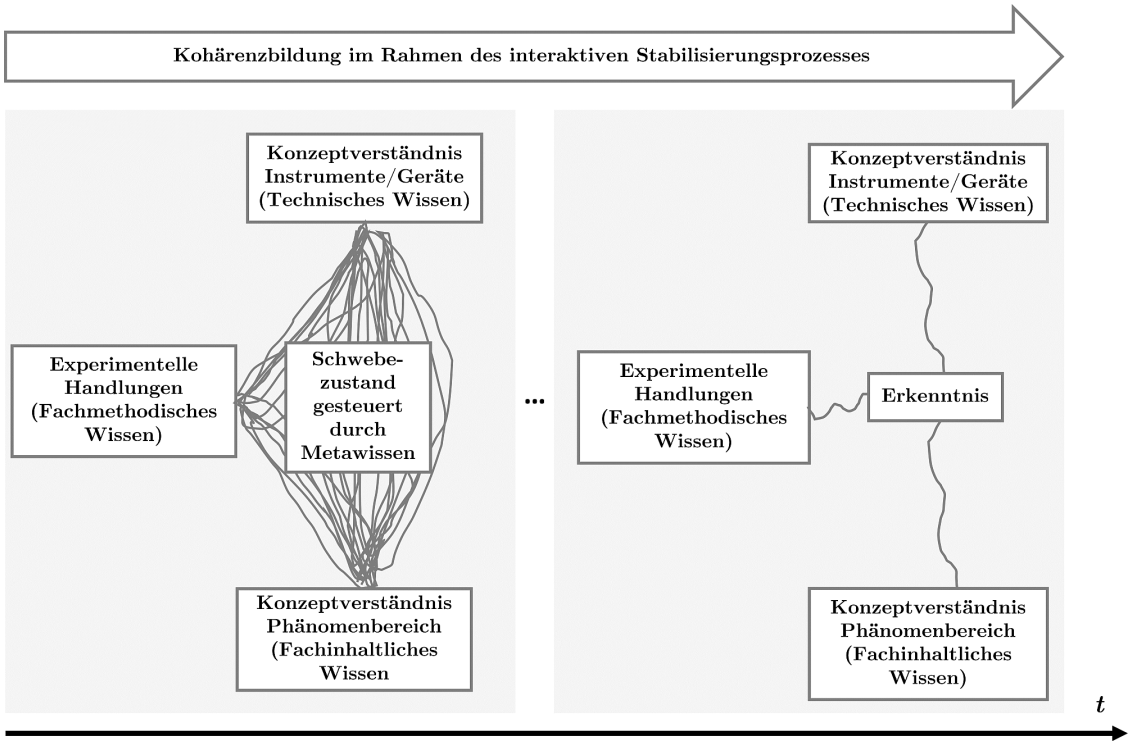


Abb. 23: Schematische Darstellung des Erkenntnisprozesses in der Physik ergänzt um die für die Performanz funktionalen Wissensressourcen.

Typik	Vernetzungsgrad	Zielorientierung
Differenzierte Analyse mit globalen Bezügen	**Systemisch**	**Prozessorientiert**
Differenzierte Analyse	**Mehrdimensional im Prozess**	**Strukturorientiert**
Oberflächliche Analyse	**Mehrdimensional innerhalb Facette**	**Qualitativ-orientiert**
Isolierte Aspekte	**Eindimensional**	**Ergebnisorientiert**
Nicht existent	**Nicht vorhanden**	**Generisch**

Abb. 24: In der Abbildung sind die rekonstruierten *relationalen Typiken*, die die Facetten der Dimension *Qualitätsausprägung* darstellen, sowie die in ihnen subsumierten Orientierungsrahmen der sinngenetischen Typiken *Vernetzungsgrad* und *Zielorientierung*, aufgelistet.

Differenzierte Analyse mit globalen Bezügen
Experimentelle Handlungen, die in diese Typik fallen, zeichnen sich durch eine hohe Vernetzung zwischen dem methodischen Vorgehen, dem experimentellen Setup, den physikalischen Überlegungen und durch eine auf die Fragestellung ausgerichtete systematische Herangehensweise für ein möglichst stabiles Herauspräparieren des physikalischen Phänomens aus. Dies ist anhand mehrerer Kontroll- und Optimierungsschleifen während des Experimentierens zu erkennen. Hierbei wird deutlich, dass die Wissensressourcen sehr adaptiv vorliegen, d. h. flexibel und funktional auf (unerwartete) Situationen angewendet werden können. Dazu werden alle Handlungen über alle Facetten hinweg aufeinander bezogen, jedes Detail des Setups hinsichtlich des Einflusses analysiert und dadurch das Messergebnis multidimensional hinsichtlich der Güte eingeschätzt. Der Prozess wird sehr sorgfältig dokumentiert und es werden diverse Handlungen mit dem Ziel der Sicherstellung der Reproduzierbarkeit absolviert.

Differenzierte Analyse
In der Typik *Differenzierte Analyse* werden Handlungen subsumiert, die zwar einen mehrdimensionalen Vernetzungsgrad der Wissensressourcen aufweisen, jedoch nicht für den Gesamtprozess funktional sind. Die Handlungen sind dadurch gekennzeichnet, dass eine Art Schema sorgfältig abgearbeitet wird, d. h. die Proband:innen können innerhalb einzelner Facetten sowie über ein paar Facetten hinweg die einzelne Bestandteile analysieren und vernetzen. Jedoch können sie die gewonnenen Erkenntnisse im weiteren Verlauf nicht für alle nachfolgenden Handlungen nutzen. Ein Beispiel dafür wäre, dass bei Analyse der Komponenten deutlich wird, dass die Messwerte schwanken und bei der Facette *Testen des exp. Setups* eine Abschätzung bezüglich des Einflusses gemacht wurde, dieser jedoch bei der *Bestimmung der Messunsicherhei*t oder *Beurteilung des Ergebnisses* außer Acht gelassen wird. Im Vergleich zur Typik *Differenzierte Analyse mit globalen Bezügen* liegt der Fokus folglich weniger auf der adaptiven Nutzung der Wissensressourcen in einem dynamischen Prozess, sondern vielmehr bei der sorgfältigen und differenzierten Abarbeitung der zentralen experimentellen Handlungsschritte. Die Reproduzierbarkeit ist bei dieser Typik kein zentrales handlungssteuerndes Element über den gesamten Prozess hinweg.

Oberflächliche Analyse
Handlungen dieser Typik sind dadurch gekennzeichnet, dass keine Verbindungen zwischen einzelnen Handlungsschritten getätigt und innerhalb der Facetten nur einzelne Bestandteile analysiert werden. Hier ist meist zu beobachten, dass z. B. nur ein oder zwei Komponenten des experimentellen Setups hinsichtlich eines Aspektes, z. B. Präzision, analysiert werden. Es zeigen sich folglich Lücken beim fachmethodischen, fachinhaltlichen und technischen Wissen. Es ist jedoch zu erkennen, dass den Handlungen einzelne Aspekte des Wissenschaftsverständnisses, wie z. B. Strategien zur Einschätzung der Qualität der Ergebnisse, zugrunde liegen, diese jedoch noch nicht funktional für die Performanz sind und dementsprechend

falsch oder unvollständig ausgeführt werden.

Isolierte Aspekte
In der Typik *Isolierte Aspekte* werden Handlungen subsumiert, die in sich geschlossen sind, d. h., dass keine Vernetzung zwischen einzelnen Wissensarten oder einzelnen Handlungsmustern stattfindet. Die Handlungen sind dadurch gekennzeichnet, dass sie wie eine Liste von abgearbeiteten Punkten wirken, ohne dass sie tiefer gehend analysiert werden oder für die nächsten Handlungen relevant sind. Beurteilungen von Aspekten erfolgen zumeist anhand von Alltagserfahrungen oder gefühlten Kriterien. Der Experimentierprozess ist auf den Erhalt eines Zahlenwertes als Messergebnis ausgerichtet, der überwiegend unreflektiert hingenommen wird. Der Prozess wird meist nur hinsichtlich der Messwerte und Ergebnisse dokumentiert.

Nicht existent
In diese Typik fallen Handlungen, die keinerlei Vernetzungen zwischen Wissensressourcen sowie nur allgemeine generische Strategien aufweisen. Sofern Handlungen getätigt wurden, basieren sie nicht auf physikspezifischen Wissensressourcen oder Strategien, vielmehr handelt es sich um generische Strategien, die mit einer ausprobierenden Haltung eingesetzt werden.

9.3.3.2. Anpassung der Dimension *Fachmethodik* und Identifikation handlungsorientierter Indikatoren

Nach der Rekonstruktion der *relationalen Typiken*, in denen auf kognitive Prozesse bei der Bearbeitung experimenteller Aufgaben geschlossen wird, ist überprüft worden, inwiefern die Typiken innerhalb der einzelnen Facetten experimenteller Handlungen auftreten und anhand welcher charakteristischen Handlungsmuster diese beobachtet werden können, damit ein eindeutiger Rückbezug der kognitiven Prozesse anhand der Performanz gewährleistet werden kann. Ziel ist somit, beobachtbare Handlungsaspekte (*handlungsorientierte Indikatoren*) abzuleiten, die auf Basis der Performanz Rückschlüsse auf unterschiedliche qualitative Ausprägungen der experimentellen Kompetenz zulassen.

Bei der Analyse des Auftretens der *relationalen Typiken* innerhalb der einzelnen Handlungsmuster ist deutlich geworden, dass nicht für alle Facetten der Dimension *Fachmethodik* (siehe Kap. 9.2), die auf Basis der beobachteten Handlungen beim Experimentieren systematisiert wurden, *handlungsorientierte Indikatoren* abgeleitet werden können.

Die Facetten *Messunsicherheit bestimmen* und *Messergebnis bestimmen* scheinen strukturell anders angelegt zu sein als die restlichen Facetten. Bei den Facetten ist deutlich geworden, dass die getätigten Handlungen der Proband:innen während

der Auswertung der Daten nur hinsichtlich der *Vollständigkeit* und *Korrektheit* und nicht hinsichtlich der *Zielorientierung* oder *Vernetzung* differenziert werden können. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in diesen Handlungsmustern im Rahmen von Experimenten, die mit Student:innenn durchgeführt werden können, lediglich vorgegebene bzw. feststehende Analyseschemata angewendet werden und keine Variationen möglich sind. Die Facette *Beurteilung der Ergebnisse* umfasst dann wiederum kognitiv anspruchsvollere Prozesse als *Anwenden* und basiert u. a. auf diesen beiden Facetten. Die Auswertungsschritte für die Messdaten werden meist schon zu Beginn oder während des Experimentes festgelegt, wenn die physikalischen und messmethodischen Ansätze oder das experimentelle Setup hinsichtlich der Messeinflüsse analysiert werden. Dementsprechend werden die beiden Facetten aus dem Kompetenzstrukturmodell gestrichen, da diese Handlungsfacetten in einem Modell, das kognitiv anspruchsvolle Ressourcen für die Bewältigung von Handlungen annimmt, nicht konsistent abgebildet werden können.

Bei den finalen sieben Facetten und zugehörigen Subfacetten ist anschließend analysiert worden, welche Handlungsmuster Indikatoren für die Einschätzung mittels der *relationalen Typiken* sind. Diese *handlungsorientierten Indikatoren* können dementsprechend als Niveauindikatoren klassifiziert werden, da anhand dieser die Qualitätseinschätzung der Performanz mittels der relationalen Typiken realisiert wird. Sie ermöglichen folglich die Rekonstruktion der Qualitätsausprägung der der Performanz zugrunde liegenden kognitiven Dispositionen.

Es konnten für alle Facetten Handlungsmuster identifiziert werden, die beobachtbar sind und Hinweise zum *Vernetzungsgrad* bzw. zur *Zielorientierung* liefern. In der Tabelle 7 sind die finalen Facetten, Subfacetten und abgeleiteten *handlungsorientierten Indikatoren* aufgelistet[76]. Die *handlungsorientierten Indikatoren* beziehen sich dabei auf die Facetten und nicht auf die Subfacetten.

Die Kombination aus den *relationalen Typiken* mit den *handlungsorientierten Indikatoren* bestimmen die Differenziertheit der Bewältigung einer experimentellen Aufgabe. Sie können in Anlehnung an das Konzept der *hierarchischen Komplexität* zu Qualitätsstufen für die Dimension *Qualitätsausprägung* systematisiert werden. Die Zuweisung einer qualitativen Ausprägung zu experimentellen Handlungen erfolgt über die Verknüpfung der Subfacetten der Dimension *Fachmethodik* mit den handlungsorientierten Indikatoren mittels des in Abbildung 25 und 26 dargestellten Rasters.

[76] Die drei Indikatoren der Facette *Beurteilung des Experimentes* deckt sich mit den Kategorien von Heinicke (2012): *experimentelle Realisierung*, *prozedural-genetisch* (Datenaufnahme) und *prozedural-evaluativ* (Auswertung) (S. 679).

Tab. 7: Darstellung der mittels *Formulierender Interpretation* identifizierten Facetten und Subfacetten zusammen mit den aus der Analyse des Vernetzungsgrades abgeleiteten handlungsorientierten Indikatoren.

Facetten	Subfacetten	Handlungsorientierte Indikatoren
Physikalische Inhalte klären	• Analysieren des physikalischen Phänomens • Festlegen der Messmethodik • Festlegen der Auswertungsmethodik	• Analysieren der relevanten Parameter • Beachten der Größenordnung der Messwerte • Analysieren des Signalverlaufs
Komponenten des exp. Setups auswählen	• Analysieren der verfügbaren Bauteile • Analysieren der verfügbaren Geräte • Analysieren der verfügbaren Messgeräte	• Analysieren der Präzision • Analysieren der Leistungsgrenzen • Analysieren der Einstellmöglichkeiten
Experimentelles Setup testen	• Analysieren der Funktionalität • Durchführen Schnellauswertungen • Analysieren von Messeinflüssen	• Sicherstellen der Signalstabilität • Schrittweises Analysieren des Setups durch Komplexitätsreduktion • Überprüfen der Passung zu theoretisch erwartetem Signalverlauf
Messplan ableiten	• Festlegen der Messbereiche • Festlegen der Schrittweiten • Festlegen der Anzahl der Messungen	• Abgleichen mit theoretischen Überlegungen • Einbeziehen von Gerätecharakteristika • Einbeziehen von Erkenntnissen des Testens
Experimentelles Setup bedienen	• Aufnehmen qualitativer Messdaten (Beobachtungen) • Aufnehmen quantitativer Messdaten • Kontrollieren der Funktionsfähigkeit	• Sorgfältig Dokumentieren • Schnellauswertung durchführen • Sicherstellen der Signalstabilität
Messergebnis beurteilen	• Messergebnis beurteilen • Messunsicherheit beurteilen • Qualitative Beobachtungen beurteilen	• Reproduzierbarkeit beachten • Vergleichen mit theor./exp. Werten • Analysieren der Abweichungen
Experiment beurteilen	• Beurteilen des Experimentes • Ableiten von Optimierungen	• Beurteilen der experimentelle Realisierung • Beurteilen der Datenaufnahme • Beurteilen des Vorgehens bei der Auswertung

	Nicht existent (0)	Isolierte Aspekte (1)	Oberflächliche Analyse (2)	Differenzierte Analyse (3)	Differenzierte Analyse mit globalen Bezügen (4)	Verknüpfende Elemente
Physikalische Inhalte klären	Inhalte klären findet nicht statt.	Subfacette/n werden pauschal ohne Verknüpfung abgearbeitet.	Subfacette/n werden hinsichtlich eines Indikators analysiert.	Mehrere Subfacetten werden hinsichtlich mehrerer Indikatoren aufeinander bezogen analysiert.	Mehrere Subfacetten werden hinsichtlich mehrerer Indikatoren aufeinander bezogen mit Passung zur Fragestellung/ zum Gesamtprozess analysiert.	**Subfacetten:** Physikalisches Phänomen, Messmethodik, Auswertungsmethodik **Handlungsorientierte Indikatoren:** Relevante Parameter, Größenordnung der Werte, Signalverlauf
Komponenten des exp. Setups auswählen	Komponenten werden ohne Analyse ausgewählt.	Subfacette/n werden auf Basis pauschaler Eigenschaften (Handhabung) oder nach Erfahrungswerten ausgewählt.	Subfacette/n werden hinsichtlich eines Indikators (experimentell oder theoretisch) analysiert und ausgewählt.	Mehrere Kriterien werden hinsichtlich mehrerer Indikatoren (experimentell oder theoretisch) aufeinander bezogen analysiert und ausgewählt.	Mehrere Subfacetten werden hinsichtlich mehrerer Indikatoren aufeinander bezogen mit Passung zur Fragestellung/ zum Gesamtprozess analysiert.	**Subfacetten:** Geräte, Experimentiermaterialien, Messgeräte **Handlungsorientierte Indikatoren:** Präzision, Leistungsgrenzen, Einstellmöglichkeiten
Experimentelles Setup testen	Gesamtsystem wird nicht getestet.	Gesamtsystem wird angesehen oder einmalig angeschaltet (ohne Messwert).	Subfacette/n werden hinsichtlich eines Indikators analysiert.	Mehrere Kriterien werden hinsichtlich mehrerer Indikatoren aufeinander bezogen analysiert.	Mehrere Subfacetten werden hinsichtlich mehrerer Indikatoren aufeinander bezogen mit Passung zur Fragestellung/ zum Gesamtprozess analysiert.	**Subfacetten:** Funktionsanalyse des Setups, Schnellauswertung, Messeinflüsse **Handlungsorientierte Indikatoren:** Signalstabilität, Komplexitätsreduktion, Passung zu theoretischen Überlegungen (Signalverlauf)
Messplan ableiten	Messplan wird nicht festgelegt.	Messplan wird pauschal festgelegt.	Subfacette/n werden hinsichtlich eines Indikators analysiert.	Mehrere Kriterien werden hinsichtlich mehrerer Indikatoren aufeinander bezogen analysiert.	Mehrere Subfacetten werden hinsichtlich mehrerer Indikatoren aufeinander bezogen mit Passung zur Fragestellung/ zum Gesamtprozess analysiert.	**Subfacetten:** Anzahl Messungen, Schrittweiten, Messbereiche **Handlungsorientierte Indikatoren:** Abgleich mit theoretischen Überlegungen, Einbezug der Gerätecharakteristika, Einbezug der Erkenntnisse des Testens

Abb. 25: In dem Raster (Teil 1) wird vorgestellt, wie das Zusammenspiel der Facetten und Subfacetten sowie der jeweiligen handlungsorientierten Indikatoren pro Facette für die Bildung der Stufen der Dimension *Qualitätsausprägung* genutzt werden.

	Nicht existent (0)	Isolierte Aspekte (1)	Oberflächliche Analyse (2)	Differenzierte Analyse (3)	Differenzierte Analyse mit globalen Bezügen (4)	Verknüpfende Elemente
Experimentelles Setup bedienen	Experimentelles Setup wird nicht bedient.	Experimentelles Setup wird willkürlich/unpassend bedient.	Subfacette/n werden hinsichtlich eines Indikators analysiert.	Mehrere Kriterien werden hinsichtlich mehrerer Indikatoren aufeinander bezogen analysiert.	Mehrere Subfacetten werden hinsichtlich mehrerer Indikatoren aufeinander bezogen mit Passung zur Fragestellung/ zum Gesamtprozess analysiert.	**Subfacetten:** Quantitative Messdaten, qualitative Messdaten, Kontrolle **Handlungsorientierte Indikatoren**: Sorgfältige Dokumentation, Schnellauswertung, Signalstabilität sicherstellen
Messergebnis beurteilen	Messergebnisse wird nicht beurteilt.	Messergebnis wird auf Basis einer "gefühlten" Korrektheit beurteilt.	Subfacette/n werden hinsichtlich eines Indikators analysiert.	Mehrere Kriterien werden hinsichtlich mehrerer Indikatoren aufeinander bezogen analysiert.	Mehrere Subfacetten werden hinsichtlich mehrerer Indikatoren aufeinander bezogen mit Passung zur Fragestellung/ zum Gesamtprozess analysiert.	**Subfacetten:** Messergebnis, Messunsicherheit, Qualitative Beobachtungen **Handlungsorientierte Indikatoren:** Reproduzierbarkeit, Vergleich mit (theoret./exp.) Werten, Einschätzen des Einflusses von experimentspezifischen Abweichungen (Fitparameter, syst. Abw., unpräzise Datenaufnahme)
Experiment beurteilen	Experiment wird nicht beurteilt und es werden keine Optimierungen vorgeschlagen.	Experiment wird pauschal als gut oder schlecht ohne Bezüge zum Experimentierprozess beurteilt und/oder es werden pauschale Optimierungen (z. B. mehr Messwerte aufnehmen) genannt.	Subfacette/n werden hinsichtlich eines Indikators analysiert.	Mehrere Kriterien werden hinsichtlich mehrerer Indikatoren aufeinander bezogen analysiert.	Mehrere Subfacetten werden hinsichtlich mehrerer Indikatoren aufeinander bezogen mit Passung zur Fragestellung/ zum Gesamtprozess analysiert.	**Subfacetten:** Experiment, Optimierungen **Handlungsorientierte Indikatoren:** Experimentelle Realisierung inkl. Messplan & Messmethodik, Datenaufnahme. Auswertungsmethodik

Abb. 26: In dem Raster (Teil 2) wird vorgestellt, wie das Zusammenspiel der Facetten und Subfacetten sowie der jeweiligen handlungsorientierten Indikatoren pro Facette für die Bildung der Stufen der Dimension *Qualitätsausprägung* genutzt werden.

9.4. Vorschlag eines performanzorientierten Kompetenzstrukturmodells für universitäres Experimentieren

In den vorangegangenen Kapiteln ist die induktive Entwicklung eines Vorschlags für ein performanzorientiertes Kompetenzstrukturmodell für das universitäre Experimentieren unter Nutzung der qualitativen Methodik der *dokumentarischen Methode* skizziert worden. Die Dimension *Inhaltsbereiche* ist im Kapitel 5 auf Basis von Experimentieranleitungen verschiedener Universitäten unter Nutzung der *Qualitativen Inhaltsanalyse* entwickelt worden. Auf Basis der *chronologischen Fallstudien* von 14 der 16 Proband:innen sind die zwei weiteren Dimensionen entwickelt worden. Mittels des Analyseschritts der *formulierenden Interpretation* konnten die Facetten der Dimension *Fachmethodik*, die die performativen Aspekte der experimentellen Kompetenz umfassen, identifiziert und auf Basis der Ergebnisse des nächsten Schrittes der *reflektierenden Interpretation* ausdifferenziert und systematisiert werden. Die Facetten der Dimension *Qualitätsausprägung*, die die kognitiven Aspekte der experimentellen Kompetenz umfassen, sind zunächst über die Rekonstruktion der Eigenlogik der einzelnen Handlungsmuster und dann mittels einer sinngenetischen und relationalen Typenbildung systematisiert worden. Hier ist anzumerken, dass die Stufe *Nicht existent* nicht für alle Facetten rekonstruiert werden konnte. Da theoretisch alle Facetten des Modells nicht bewältigt werden können, ist diese Stufe für alle Facetten integriert worden.[77]

Das vollständige Kompetenzstrukturmodell mit den drei Dimensionen ist in Abbildung 27 dargestellt.

Das Kompetenzstrukturmodell umfasst demnach sowohl performative als auch kognitive Aspekte der experimentellen Kompetenz. Es wird demnach davon ausgegangen, dass bei einer speziell ausgeprägten Performanz dazu passende kognitive Dispositionen vorliegen müssen. Das verknüpfende Element zwischen den beiden Dimensionen stellen die identifizierten *handlungsorientierten Indikatoren* dar, die zusammen mit den relationalen Typiken eine Verknüpfung der beiden Dimensionen ermöglichen. Die Indikatoren haben sich als neuralgische Punkte bei der Zuweisung einer Qualitätsausprägung zu den Handlungsmustern herausgestellt, d. h. anhand dieser Aspekte kann die Qualität unterschiedlich fähiger Proband:innen beim Experimentieren eingeschätzt werden.

[77] Hier ist zu vermuten, dass bei der Nutzung einer Stichprobe mit Erst- und Zweitsemesterstudierenden in allen Facetten die Stufe *Nicht existent* identifizierbar gewesen wäre. Die Einschätzung der Proband:innen mit den Facetten der beiden Dimensionen ist in Kap. 9.5 zu finden.

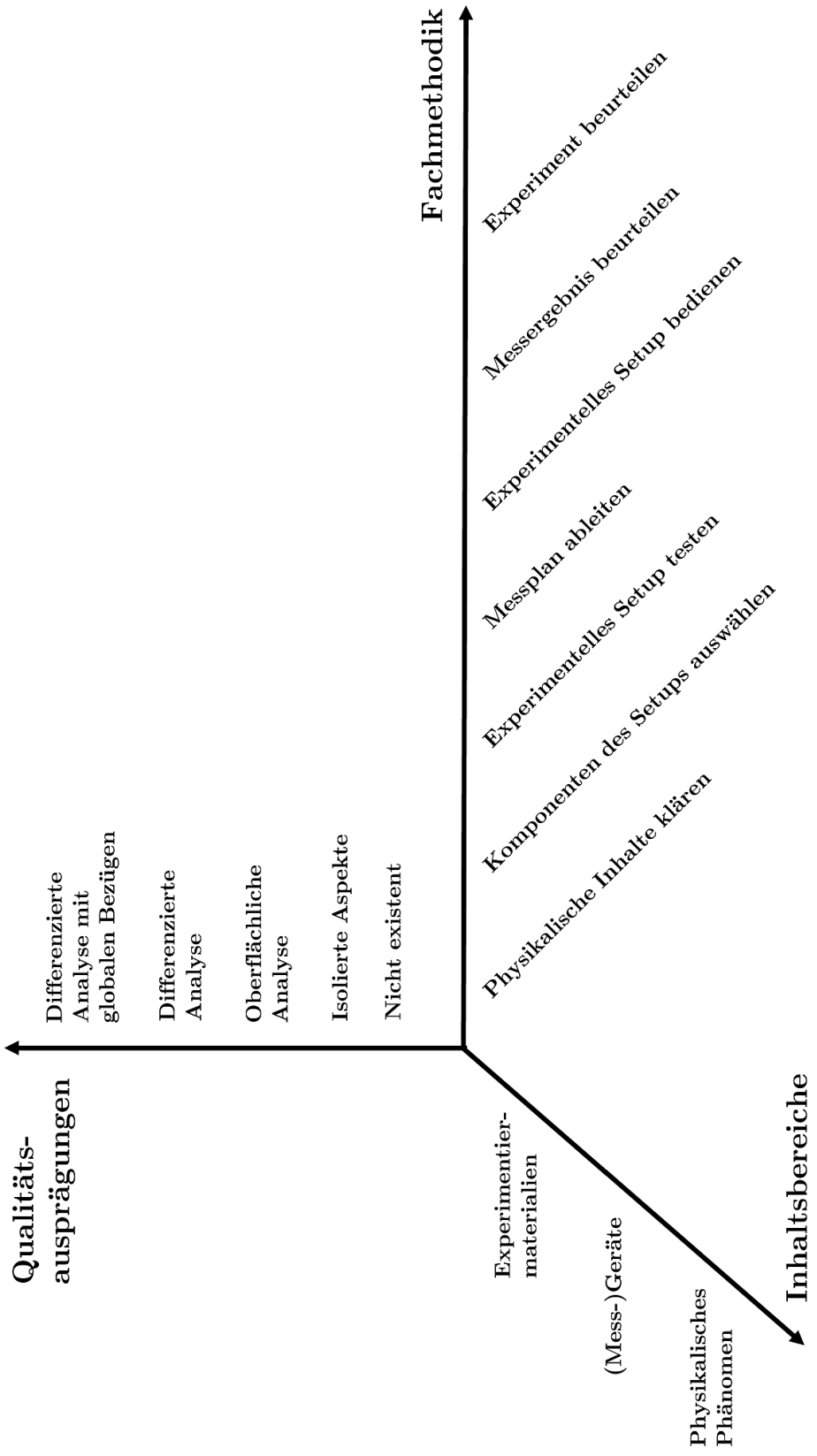


Abb. 27: Vorschlag für ein performanzorientiertes Kompetenzstrukturmodell für die experimentelle Kompetenz auf universitärem Niveau.

9.5. Anwendung und Prüfung des Kompetenzstrukturmodells auf Ebene der Proband:innen

Bei der Darstellung der Entwicklung des Kompetenzstrukturmodells ist bisher nur ausschnitthaft die Performanz einzelner Proband:innen dargestellt worden. Im Folgenden sollen nun mittels des Modells für alle Proband:innen Fähigkeitsprofile erstellt und vergleichend diskutiert werden. Ziel ist, einerseits die kritische Diskussion der Fähigkeitsprofile, um Hinweise zur Plausibilität des Modells zu erhalten. Andererseits soll auch mittels eines Gruppenvergleichs (Expert:innen, Laborpraktikum mit fachmethodischen Fokus, traditionelles Laborpraktikum) analysiert werden, ob durch das Modell Unterschiede anhand der Fähigkeitsprofile identifiziert werden können (Kap. 9.5.1). Dieser Aspekt ist vor dem Hintergrund von großer Bedeutung, dass die Stufen der Dimension *Qualitätsausprägungen* nicht innerhalb der einzelnen Facetten, sondern basierend auf dem jeweiligen Gesamtprozess, entwickelt worden sind. Neben Aussagen zur Auflösung des Modells soll die Analyse Aufschluss darüber geben, ob alle Stufen des Kompetenzstrukturmodells in allen Facetten besetzt sind.

Zur weiteren Fundierung des Modells wird überprüft, inwiefern die Fähigkeitsprofile basierend auf der Performanz mit den Äußerungen der Proband:innen in den Stimulated Recall Interviews übereinstimmen. Bei einigen Proband:innen ist bei der Rekonstruktion der Orientierungsrahmen deutlich geworden, dass sie über Wissensressourcen (inhaltlich, fachmethodisch, technisch, konzeptuell) verfügen, diese jedoch nicht funktional für die Performanz sind. Der Abgleich der beiden unterschiedlichen Datentypen soll hier Hinweise zu den Gründen dieser Diskrepanzen liefern (Kap. 9.5.2).

9.5.1. Vergleichende Analyse aller Fälle - Fähigkeitsprofile aller Proband:innen

Mittels der folgenden vergleichenden Analyse aller Proband:innen soll die Auflösung des entwickelten Kompetenzstrukturmodells überprüft werden. Hierzu werden für alle Proband:innen Fähigkeitsprofile auf Basis der *chronologischen Fallstudien* mittels des Kompetenzstrukturmodells erstellt.[78] Die Fähigkeitsprofile werden hinsichtlich unterschiedlicher Aspekte (Aufgabenzuordnung, Gruppenzugehörigkeit, Fähigkeitsausprägung auf individueller Ebene) analysiert, um zu überprüfen, ob Hinweise gefunden werden können, die für eine ausreichende und plausible Auflösung des Modells sprechen.

[78] Hier soll für die Erhöhung der Leserfreundlichkeit wieder darauf hingewiesen werden, dass die Proband:innen der weniger komplexen Aufgabenstellung 1 männliche Vornamen erhalten haben und die Proband:innen der komplexeren Aufgabenstellung weibliche Vornamen tragen.

In einem ersten Schritt werden zunächst die Fähigkeitsprofile der Proband:innen abhängig von der bearbeiteten Aufgabenstellung analysiert. Ziel ist zu überprüfen, ob die Zuordnung der Proband:innen zu den Aufgabenstellungen, basierend auf dem Zufallsprinzip, funktional gewesen ist, d. h. es soll überprüft werden, ob Decken- oder Bodeneffekte auftreten, die für eine unterschiedliche Fähigkeitsverteilung der Proband:innen auf die Aufgabenstellungen sprechen würden. In Abb. 28 sind die Fähigkeitsprofile aller Proband:innen dargestellt. Bei beiden Aufgabenstellungen können Proband:innen auf allen Ausprägungsstufen pro Facette identifiziert werden. Die Fähigkeitsverteilung der Proband:innen innerhalb der Fähigkeitsprofile ist bei der Aufgabenstellung 2 jedoch deutlich heterogener. Einzelne Proband:innen weisen hier zwischen zwei Facetten Sprünge über teilweise zwei Ausprägungsstufen auf. Die Proband:innen der Aufgabenstellung 1 sind als homogener einzuschätzen. Die unterste Qualitätsausprägung (*Nicht existent*) ist nur in sehr wenigen Fähigkeitsprofilen vertreten. Hier ist zu vermuten, dass die Nutzung des Modells, z. B. bei der Performanz von Erstsemesterstudierenden, eine höhere Besetzung dieser Stufe zur Folge hätte. Dies müsste allerdings noch geprüft werden.

Grundsätzlich kann jedoch festgehalten werden, dass alle Ausprägungsstufen bei beiden Aufgabenstellungen in allen Facetten besetzt sind. Daraus folgt, dass die Verteilung der Proband:innen auf die Aufgabenstellungen mittels Zufallsprinzip keine Decken- oder Bodeneffekte verursacht hat und eine relative Gleichverteilung unterschiedlich fähiger Proband:innen auf die Aufgabenstellungen geglückt ist.

Bei der Zuordnung der Proband:innen zu den Aufgabenstellungen ist bei der Stichprobenzusammensetzung Wert darauf gelegt worden, dass pro Aufgabe eine ungefähr gleiche Anzahl an Studierenden aus den beiden Gruppen *Laborpraktikum mit fachmethodischem Schwerpunkt* (Gruppe 2) und *Traditionelles Laborpraktikum* (Gruppe 3) realisiert werden kann. Ziel ist nun zu überprüfen, ob das Kompetenzstrukturmodell eine ausreichende Auflösung für die Identifikation unterschiedlicher Fähigkeitsgruppen besitzt. In Abb. 29 sind pro Facette die Mittelwerte der erreichten Qualitätsausprägungsstufe pro Facette inklusive Standardabweichung dargestellt.

Die Gruppe der Expert:innen erreicht im Mittel deutlich höhere Ausprägungsstufen als die anderen beiden Gruppen. In allen Facetten, außer bei *Physikalische Inhalte klären*, erreichen sie höhere Ausprägungsstufen außerhalb der Standardabweichung. Aufgrund der geringen Probandenzahl können hier keine aussagekräftigen Überprüfungen der Signifikanz der Unterschiede bestimmt werden. Jedoch erlaubt diese Beobachtung die Schlussfolgerung, dass das Modell in der Lage ist, Expert:innen von Noviz:innen bzw. Fortgeschrittenen zu unterscheiden.

Der Vergleich der beiden studentischen Gruppen (*Laborpraktikum mit fachmethodischem Schwerpunkt* versus *Traditionelles Laborpraktikum*) zeigt, dass auch

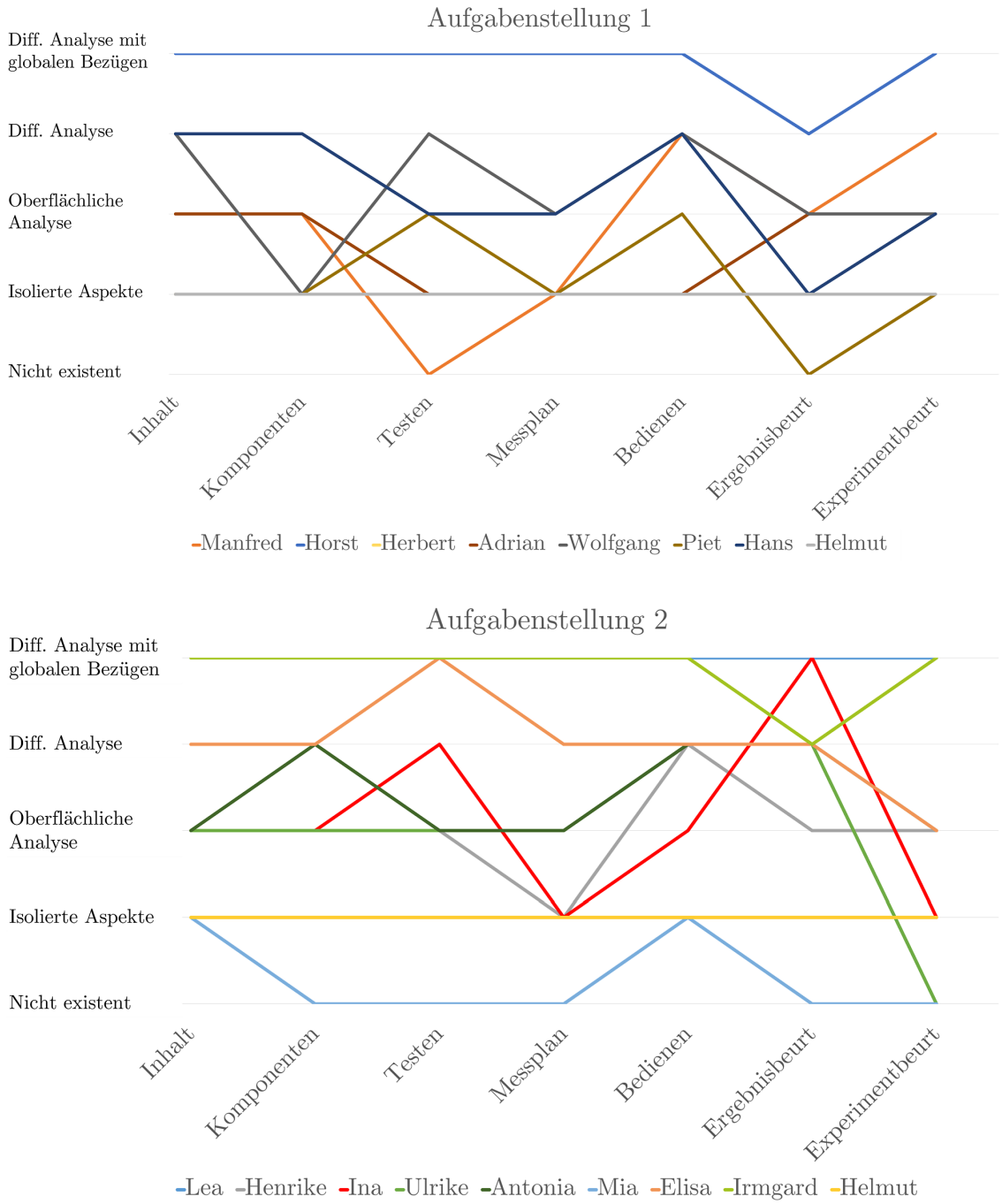


Abb. 28: In der Abbildung sind die Fähigkeitsprofile aller Proband:innen für die Aufgabe 1 (oben) und Aufgabe 2 (unten) dargestellt. Einige Linien sind doppelt belegt, sodass es zu Überlappungen kommt. Anhand der Abbildung soll nur gezeigt werden, dass alle Facetten der beiden Dimensionen belegt sind.

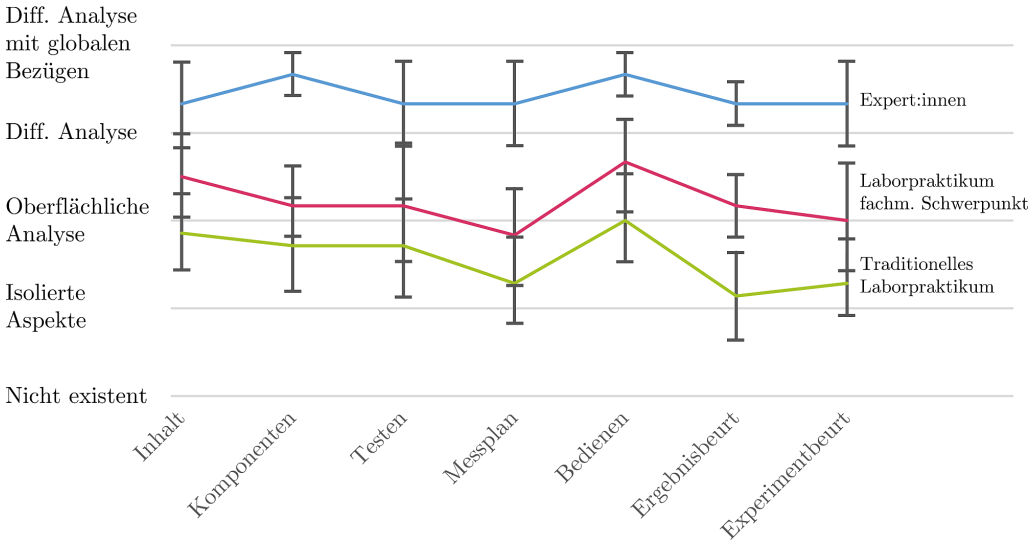


Abb. 29: In der Abbildung sind die Fähigkeitsprofile der Gruppen (Expert:innen, Studierende mit fachmethodischem Praktikum, Studierende mit traditionellem Praktikum) vergleichend dargestellt.

diese beiden Gruppen sich im Mittel in allen Facetten hinsichtlich der erreichten Ausprägungsstufe unterscheiden, jedoch nicht in allen Facetten außerhalb der Standardabweichung. Die Gruppe 2 erreicht im Mittel in fast allen Facetten Ausprägungsstufen oberhalb der Stufe *Oberflächliche Analyse*, während die Gruppe 3 eher zwischen den Komponenten *Isolierte Aspekte* und *Oberflächliche Analyse* schwankt. Die deutlichste Abweichung ist bei der Facette *Ergebnis beurteilen* zu beobachten. Vor dem Hintergrund des Fokus des *Laborpraktikums mit fachmethodischem Schwerpunkt* auf die Ausbildung methodischer Fähigkeiten erscheinen diese Beobachtungen plausibel. Auch sie können aufgrund der geringen Probandenzahlen nicht weitergehend statistisch analysiert werden. Jedoch kann auf Basis des Vergleichs der unterschiedlichen Gruppen der Hinweis festgehalten werden, dass die Auflösung des Kompetenzstrukturmodells ausreichend ist, um Gruppen unterschiedlicher Praktikumskonzeptionierung, bzw. auch durch Außenkriterien bestimmte Expertengruppen, aufzulösen.

Im nächsten Schritt werden auf individueller Ebene die Fähigkeitsprofile der studentischen Proband:innen, abhängig von der besuchten Praktikumskonzeptionierung und vom durch das Außenkriterium *Ausbildungsstand* zugewiesenen Expertisegrad, analysiert (Abb. 30). Ziel ist, zu überprüfen, welche Fähigkeitsprofile die einzelnen Proband:innen aufweisen und ob Unterschiede zwischen den Proband:innen trotz gleichen Ausbildungsstands mittels des Modells aufgelöst werden können.

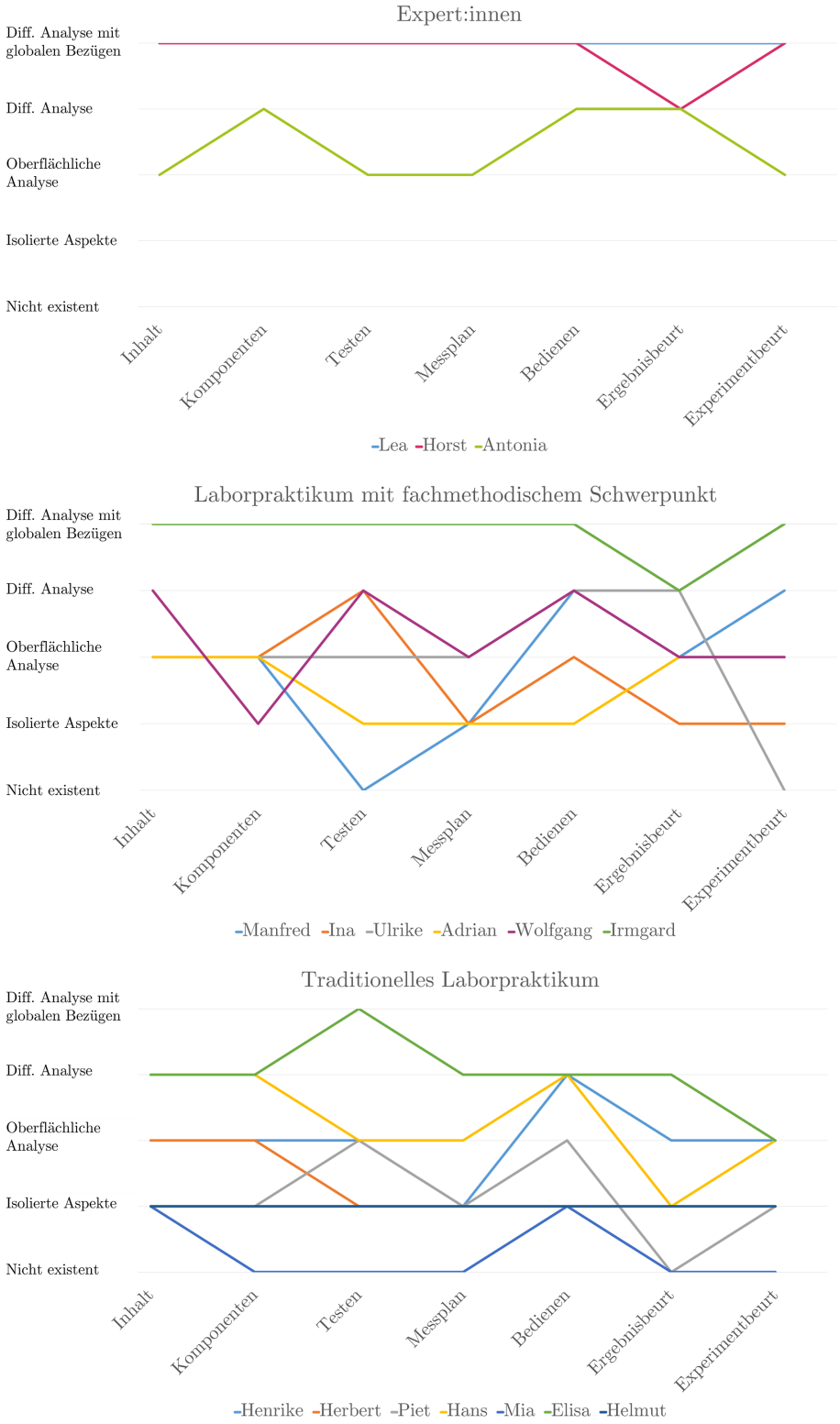


Abb. 30: In den Abbildungen sind die Fähigkeitsprofile der Expert:innen (oben), der Studierenden mit Laborpraktikum mit fachmethodischem Schwerpunkt (mittig) und der Studierenden mit traditionellem Laborpraktikum (unten) vergleichend dargestellt.

Beim Vergleich der individuellen Fähigkeitsprofile abhängig vom besuchten Veranstaltungsformat und Expertisegrad, fällt besonders **Irmgard**, die das *Laborpraktikum mit fachmethodischem Fokus* absolviert hat, auf. Sie hat die Aufgabenstellung 2 mit der gleichen Qualitätsausprägung der experimentellen Fähigkeiten absolviert, wie die Expertin **Lea** mit mehreren Jahren Postdoc-Erfahrung und der Experte Horst am Ende seiner Promotion. Sie weist sogar eine deutlich höhere Qualitätsausprägung der Performanz als **Antonia** auf, die einen Masterabschluss besitzt.

Bei der Gruppe 3 (Traditionelles Laborpraktikum) weist **Mia** das auffälligste Fähigkeitsprofil auf. Sie erreicht maximal die Ausprägungsstufe *Isolierte Aspekte* und das auch nur in zwei Facetten. Bis auf das Leistungsprofil von **Helmut**, der in allen Facetten nur die Ausprägungsstufe *Isolierte Aspekte* erreicht, stellen sich die anderen Fähigkeitsprofile mit teilweisen Sprüngen über zwei Ausprägungsstufen deutlich heterogener dar.

Die Fähigkeitsprofile zeigen, dass die Qualitätsausprägungen der Proband:innen, unabhängig von der Gruppenzugehörigkeit, über die Facetten hinweg deutlich variieren. Dies liefert einen Hinweis dafür, dass die ausgewählten Proband:innen eine ausreichend hohe Varianz innerhalb ihrer Fähigkeiten aufweisen, sodass eine passgenaue Entwicklung des Modells gewährleistet werden konnte. Weiterhin wurde an den Fällen **Antonia** (Masterabschluss) und **Irmgard** (Ende 3. Semester) deutlich, dass die Zuweisung einer Expertise mittels Außenkriterium (hier Ausbildungsstand) nicht immer passgenau zu den individuellen Fähigkeiten ist. Die Auflösung des Modells und damit verbunden die modellierte Stufung der qualitativen Ausprägung experimenteller Fähigkeiten scheint eine ausreichende Auflösung zu erlauben.

Insgesamt können auf Basis der analysierten Fähigkeitssprofile, die unter Nutzung des entwickelten Kompetenzstrukturmodells erstellt worden sind, erste Hinweise gefunden werden, dass die Auflösung des Modells ausreichend differenziert ist, um unterschiedlich fähige Proband:innen aufzulösen. Weiterhin ist es mittels des Modellierungsansatzes für die Dimension *Qualitätsausprägung* gelungen, in allen Facetten fast alle Ausprägungsstufen zu besetzen. Einzig die Stufe *Nicht existent* ist nicht immer besetzt. Aufgrund der geringen Probandenzahlen können hier jedoch keine Aussagen zu statistisch signifikanten Unterschieden hinsichtlich der experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten gemacht werden.

9.5.2. Vergleichende Analyse aller Fälle - Abgleich der Fähigkeitsprofile mit den Äußerungen in den Stimulated Recall Interviews

In einem weiteren Schritt werden auch die Stimulated Recall Interviews mit Hilfe des Modells auf Qualitätsausprägungen hin analysiert und mit den aus der

Beschreibung der Performanz gewonnenen Ausprägungen verglichen. Ziel ist zu prüfen, ob die in den Interviews identifizierten Wissensressourcen der Proband:innen den Fähigkeitsprofilen entsprechen oder ob Unterschiede gefunden werden können. Auslöser dafür ist die Beobachtung, dass bei den Proband:innen der Gruppen 2 und 3 anhand der Performanz auf vorliegende Wissensressourcen, die jedoch nicht für die Performanz funktional sind, geschlossen werden konnte (Kap. 9.3.2). Dabei stellt sich die Frage, ob der Vergleich der beiden unterschiedlichen Datenlagen (Handlungen, verbale Daten) eine Einschätzung ermöglicht, bei wie vielen Proband:innen dies zu beobachten ist. Dazu werden die Antworten ausgewählter Proband:innen aus den Stimulated Recall Interviews zu den Fragen nach dem hypothetischen Vorgehen beim Experimentieren (Kap. 7.2.1) verwendet. Die nachfolgende Ergebnisdarstellung erfolgt auf Basis ausgewählter möglichst kontrastiver Fälle, die die Gesamtheit der Ausprägungen in der Stichprobe repräsentieren. Proband:innen, die sehr ähnliche Profile aufweisen, werden zur Steigerung der Übersichtlichkeit nicht dargestellt. Die Ergebnisse der ausgewählten Proband:innen können auch Hinweise dazu liefern, inwieweit strukturierte Interviews eine Einschätzung der Qualität der experimentellen Kompetenz ermöglichen. Aufgrund der unterschiedlichen Struktur von explizierbaren und impliziten Wissensbeständen (u. a. Neuweg 2011) können die in diesem Kapitel abgeleiteten Erkenntnisse zur Passung des Modells lediglich als Hinweise verstanden werden, die z. B. als Ausgangspunkt für zukünftige Untersuchungen genutzt werden können.

Methodisch werden die Transkripte der Stimulated Recall Interviews, hier im Besonderen die Nachfragen zu hypothetischen (alternativen) Handlungsmustern des Kompetenzstrukturmodells, codiert und vergleichend ausgewertet. Der Vergleich der beiden Datenlagen (Performanz, Verbale Daten) wird nachfolgend anhand zweier Facetten (*Messplan ableiten*, *Messergebnis beurteilen*) mit ausgewählten Proband:innen illustriert.

In den Abbildungen 31 und 32 sind die durch die Codierung der Performanz erreichten Ausprägungsstufen (grün) und die über die Codierung der Interviews erreichten Ausprägungsstufen (pink) ausgewählter Proband:innen in den Facetten *Messplan ableiten* und *Ergebnis beurteilen* dargestellt.

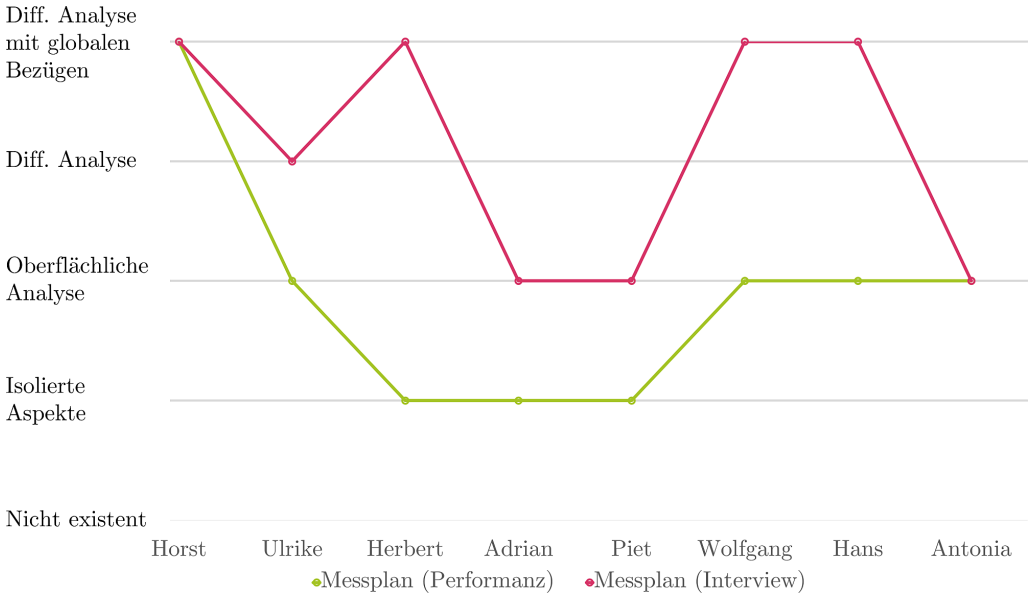


Abb. 31: Vergleich der erreichten Qualitätsausprägungen ausgewählter Proband:innen bei der Performanz und bei den getätigten Äußerungen in den Interviews in der Facette *Messplan ableiten*

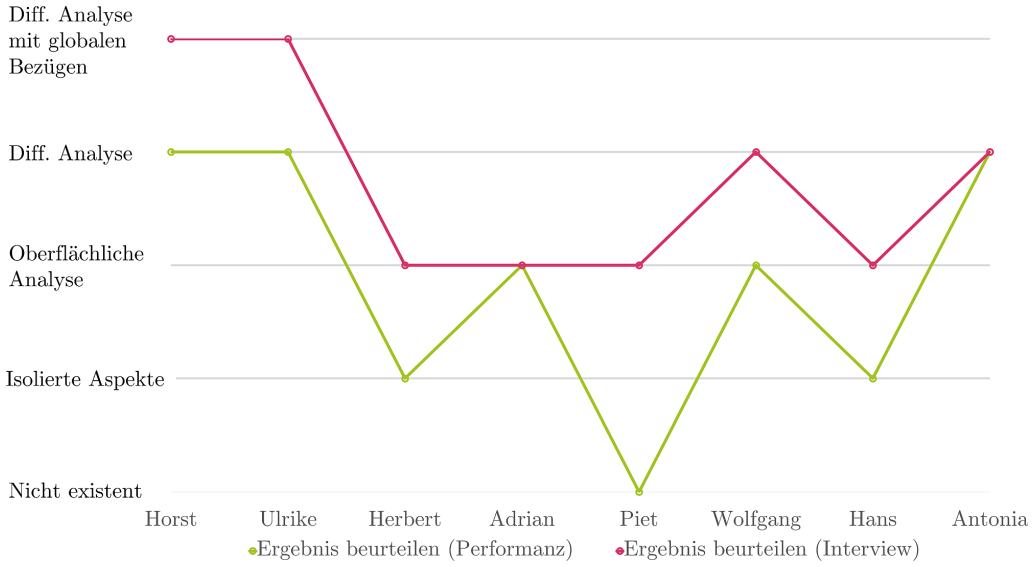


Abb. 32: Vergleich der erreichten Qualitätsausprägungen ausgewählter Proband:innen bei der Performanz und bei den getätigten Äußerungen in den Interviews in der Facette *Messergebnis beurteilen*

In der Abbildung 31 ist zu erkennen, dass bei den beiden Expert:innen **Horst** und **Antonia** keine Unterschiede hinsichtlich des Ausprägungsgrades der experimentellen Kompetenz abhängig vom Datenmaterial identifiziert werden können. Bei **Lea** (nicht in der Abb.) ist dies beispielsweise auch der Fall. Im Kapitel 9.5.1

ist anhand von **Antonias** Leistungsprofil deutlich geworden, dass die durch das Außenkriterium *Ausbildungsstand* zugewiesene Expertise sich nicht in der Performanz widerspiegelt. Die Analyse zeigt, dass *Antonia* auch im reflektierenden Gespräch zu der bearbeiteten experimentellen Aufgabenstellung keinen höheren Ausprägungsgrad erreicht. Andersherum konnte mittels der Analyse gezeigt werden, dass **Irmgard** (nicht in der Abb.), die ein Leistungsprofil mit den höchsten Ausprägungsstufen besitzt, im Interview die gleichen Ausprägungsstufen erreicht, sodass hier die Vermutung abgeleitet werden kann, dass die ihr über die Performanz zugeschriebenen Unterschiede in der Qualität der experimentellen Kompetenz angemessen sind.

Weiterhin sind die Ergebnisse von **Herbert**, **Wolfgang** und **Hans** aufgrund der großen Diskrepanz zweier Ausprägungsstufen zwischen der Performanz und dem Interview interessant. Bei einer genaueren Analyse der einzelnen Aussagen der drei Proband:innen wird deutlich, dass sie bei den Fragen zum hypothetischen Vorgehen sehr differenzierte Aussagen dazu machen konnten, wie sie einen *Messplan* hätten erstellen können. Diese Wissensressourcen sind allerdings nicht anhand der Performanz beobachtbar gewesen, sodass hier Schwierigkeiten bei der "Transformation von Wissen [Wissen 2] in Können [Wissen 3]" (Neuweg 2002, S. 17) vermutet werden können, was auch durch die Ergebnisse der Analysen der Orientierungsrahmen (Kap. 9.3.2) gestützt werden kann. Die Analyse zeigt, dass bei einigen Proband:innen anhand der Performanz Orientierungsrahmen, die als *struktur-* bzw. *qualitativ-orientiert* zu charakterisieren sind, identifiziert werden können. Die beiden Orientierungsrahmen unterscheidet, dass bei einer *Strukturorientierung* das implizite Regelsystem bei der Anwendung einer experimentellen Fähigkeit vorliegt, jedoch gelingt dessen Anwendung für das Handeln noch nicht elaboriert bzw. differenziert, während bei der *qualitativ-orientierten* Ausprägung die grundlegende Idee zu möglichen Handlungen vorliegt, diese jedoch nicht in der Situation angewendet werden kann. Vertiefende Aussagen können an dieser Stelle aufgrund der Datenlage nicht getätigt werden. Dies könnte jedoch zukünftig durch z. B. gleichzeitige Erhebung der Performanz sowie der Wissensressourcen über einen standardisierten Wissenstest zur Fachmethodik des Experimentierens realisiert werden. Das in diesem Projekt entwickelte Modell könnte als Grundlage für die Testentwicklung dienen und so weitere Untersuchungen ermöglichen.

Der Vergleich der Performanz der Proband:innen mit den Interviewaussagen bzgl. der Facette *Ergebnis beurteilen* zeigt ein leicht abweichendes Bild. Hier ist zu sehen, dass die Abweichungen der Ausprägungsgrade pro Proband bei den meisten Proband:innen deutlich geringer sind als bei der Facette *Messplan ableiten*. Einzig **Piet** zeigt hier einen Sprung von zwei Ausprägungsstufen. Der Orientierungsrahmen von **Piet** bei der *Zielorientierung* ist als *ergebnisorientiert* rekonstruiert worden. Sein Ziel bei der Bearbeitung der Aufgabenstellung ist die Generierung eines Zahlenwertes, jedoch nicht die Einschätzung der Plausibilität des Ergebnisses gewesen. Beim Stimulated Recall Interview ist er speziell danach gefragt worden.

Es zeigt sich, dass er durchaus über die Wissensressourcen verfügt, wie experimentelle Daten interpretiert bzw. hinsichtlich ihrer Plausibilität eingeschätzt werden können, dies ist jedoch in der Situation nicht für die Handlung funktional gewesen. Gleiches kann z. B. bei **Mia** und **Henrike** (beide nicht in der Abb.) beobachtet werden. Beide haben bei der Bearbeitung aufgrund fehlender experimenteller Fähigkeiten so große Schwierigkeiten gehabt, dass sie das Experiment nicht vollständig durchführen konnten. An dieser Stelle kann die Steigerung des Ausprägungsgrades als Nachfrage bedingt und somit als plausibel eingeschätzt werden. Bei *Adrian* und *Antonia* sowie bei fünf anderen Proband:innen, die hier nicht abgebildet sind, kann in der Facette *Ergebnis beurteilen* kein Unterschied zwischen der Performanz sowie der anschließenden verbalen Analyse des Prozesses im Rahmen der Stimulated Recall Interviews festgestellt werden. Aufgrund der Häufigkeit dieser Beobachtung kann hier vermutet werden, dass sich die Analyse der Facette *Ergebnis beurteilen* auch für verbale Assessment-Formate eignet. Dies ist vor dem Hintergrund plausibel, dass diese Facette vorrangig als kognitiv und nicht performativ charakterisiert werden kann, weil die Proband:innen im Rahmen von Laborpraktika durch das Schreiben von Laborberichten, hier im Besonderen durch das Kapitel Auswertung und Diskussion, diese experimentellen Fähigkeiten auch explizierbar ausgebildet haben.

Insgesamt haben die vorangegangenen Analysen Hinweise dafür geliefert, dass die Einschätzungen der Ausprägungsgrade der experimentellen Fähigkeiten mittels des Kompetenzstrukturmodells auf Basis der Performanz plausibel erscheinen. Weitergehende Aussagen erfordern allerdings genauere Untersuchungen anhand standardisierter Testverfahren (siehe Kap. 11.2.1).

10. Diskussion und Prüfung des Modells

Die Prüfung der Passung des entwickelten Kompetenzstrukturmodells (Kap. 9.4) zu unterschiedlichen Perspektiven auf das universitäre Experimentieren wird im Folgenden auf drei Ebenen realisiert (Kap. 33). Auf *Ebene der Fachphysik* wird mittels eines Interratings mit einem Fachwissenschaftler die Passung des Modells zur Perspektive Fachwissenschaft Physik auf das Experimentieren geprüft (Kap. 10.1). Dabei wird ebenfalls analysiert, ob die Beschreibung und Systematisierung der Dimensionen auch für die Nutzung durch Fachphysiker:innen für die Gestaltung von Laborpraktika oder für die Einschätzung studentischer Leistungen geeignet sind. Diese Überprüfung gibt Aufschluss über die Einsetzbarkeit des Modells in Laborpraktika, die typischerweise von Fachphysiker:innen gestaltet und betreut werden. Die Passung des Modells zur Perspektive der *Praktikumsleiter:innen* wird mittels eines Expertenratings, an denen Praktikumsleiter:innen aus ganz Deutschland teilgenommen haben, überprüft (Kap. 10.2). Abschließend werden alle Erkenntnisse dieses Projektes in den fachdidaktischen Diskurs eingeordnet (Kap. 10.3) und vor dem Hintergrund der Gütekriterien qualitativer Forschung (Kap. 10.4) hinsichtlich ihrer Güte und Geltung diskutiert.

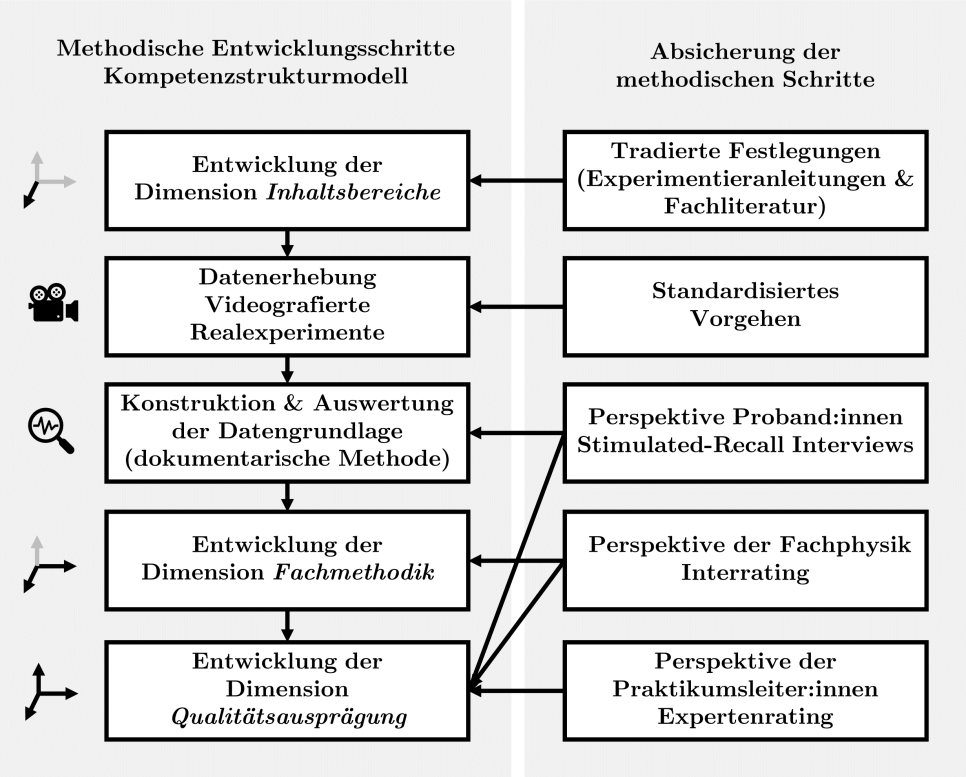


Abb. 33: Übersicht über das Untersuchungsdesign inklusive der Darstellung der Absicherung der methodischen Schritte.

10.1. Passung des Modells zur Perspektive der Fachwissenschaft Physik auf das Experimentieren

Der entwickelte Vorschlag für ein performanzorientiertes Kompetenzstrukturmodell soll es ermöglichen, die universitäre, fachmethodische Ausbildung von Student:innen systematisch zu gestalten. Umso wichtiger ist es deswegen, dass das Modell die relevanten Aspekte physikalischen Experimentierens in der Forschung adressiert und eine hohe Passung zur Fachmethodik *Experimentieren* aus der Perspektive der Fachwissenschaft aufweist. Aufgrund fehlender Forschungsarbeiten in diesem Bereich wird sich diesem Aspekt mittels eines Interratings genähert.

Interratings werden in der qualitativen Forschung dazu genutzt zu überprüfen, inwieweit die Einschätzungen durch unterschiedliche Personen übereinstimmen, um so Hinweise dazu zu bekommen, wie unabhängig die Ergebnisse eines Projektes vom Beobachtenden sind. Im Folgenden wird zunächst dargestellt, wie das Interrating mit einem Fachwissenschaftler (5. Jahr als Postdoc) methodisch gestaltet wurde (Kap. 10.1.1) und im Anschluss, zu welchen Ergebnissen das Verfahren geführt hat (Kap. 10.1.2).

10.1.1. Methodisches Vorgehen und Rahmenbedingungen

Der Ansatz des Interratings soll es ermöglichen, zu überprüfen, ob das entwickelte Modell eine hohe Passung zum physikalischen Experimentieren in der Forschung ausweist. Dies wird über die Prüfung der Übereinstimmung der Einschätzung der Leistungen der Proband:innen durch einen Fachwissenschaftler der Physik und mittels der Einschätzungen der Entwicklerin des Modells realisiert.

Der Fachwissenschaftler ist in seinem fünften Postdoc-Jahr und forscht im Bereich der Experimentalphysik. Er besitzt dementsprechend umfangreiche Erfahrungen in der Ausbildung von Student:innen beim Experimentieren sowie in der Begleitung von Abschlussarbeiten (Bachelor-, Master- und Promotionsarbeiten). Es wurde an dieser Stelle kein professoraler Interrater gesucht, da aufgrund der Struktur physikalischer Forschungsprojekte vor allem die Postdocs die Student:innen und Promovierenden in erster Instanz beim Experimentieren im Labor und beim Auswerten von Daten begleiten.

Da das Modell in Zukunft für die Einschätzung der performativen Qualität beim Experimentieren genutzt werden soll, sind nur die *chronologischen Fallstudien* ausgewählter Proband:innen für das Interrating genutzt worden. Die Stimulated Recall Interviews haben sich aufgrund der Problematiken, dass explizierbares Wissen nicht unbedingt die Wissensressourcen darstellen, die für das Handeln funktional sind, sowie, dass Expert:innen oftmals ihre komplexen Wissensres-

sourcen nicht verbalisieren können, als nicht geeignet erwiesen (u. a. Neuweg 2015). Die Handlungsbeschreibungen sind aufgrund der zeitlichen Praktikabilität den Videomitschnitten vorgezogen worden. Es war nicht praktikabel, mehrere Stunden Videomaterial sowie die weiteren Materialien, die bei der Erhebung entstanden sind (Laborjournal, Auswertungsdatei, Internetsuche), einzuschätzen. Die *chronologischen Fallstudien* sind so gestaltet, dass alle erhobenen Materialien zusammengefügt wurden, sodass sichergestellt wird, dass der Komplexität der Performanz Rechnung getragen wird, auch wenn die Videomitschnitte genutzt werden konnten.

Für das Interrating sind sechs Proband:innen (von 16) genutzt worden. Vier Proband:innen sind schon bei der Entwicklung des Modells genutzt worden (**Lea, Adrian, Piet** und **Elisa**). Für die Auswahl der Proband:innen war die unterschiedliche Qualität der Performanz relevant sowie die Verteilung der Proband:innen auf die beiden unterschiedlich komplexen experimentellen Aufgabenstellungen. **Lea** und **Elisa** haben die komplexere Aufgabe und **Adrian** sowie **Piet** die weniger komplexe Aufgabenstellung bearbeitet. Weiterhin sind zwei Fälle für die Entwicklung des Modells nicht genutzt worden, damit sie ohne Modellbezug für das Interrating genutzt werden können (**Irmgard**, **Helmut**). Ziel ist, sicherzustellen, dass auch Fälle, die nicht für die Entwicklung genutzt wurden, mittels des Modells hinsichtlich ihrer performativen Qualität eingeschätzt werden können. **Irmgard** hat die komplexere Aufgabenstellung bearbeitet und ist der Gruppe 2 der Proband:innen (Praktikum mit fachmethodischem Fokus) zuzuordnen. **Helmut** bearbeitete die weniger komplexe Aufgabenstellung und gehört zur Gruppe 3 (traditionelles Praktikumskonzept).

Für das Interrating sind die Facetten der Dimensionen *Fachmethodik* und *Qualitätsausprägung* in MAXQDA überführt worden. Da der Fachwissenschaftler noch nie im Bereich der qualitativen Forschung gearbeitet hat, sind mit ihm zunächst die Zielsetzungen und grundlegenden methodischen Schritte der Modellentwicklung besprochen worden, damit er eine Vorstellung davon erhält, wie sich das Interrating in die Forschungslogik des Projektes einbettet. Des Weiteren hat der Fachwissenschaftler das Kapitel 2.1 gelesen, um sicherzustellen, dass das Vokabular und die grundsätzliche Beschreibung der experimentellen Methode in der physikalischen Forschung verstanden worden sind. Hier zeigte sich, dass der Fachwissenschaftler allen Aspekten zustimmen kann, sodass sichergestellt werden konnte, dass keine Abweichungen aufgrund unterschiedlicher Begriffsverständnisse auftreten. Weiterhin hat er zur Vorbereitung die Tabellen 25 und 26 mögliche Musterlösungen der beiden Aufgabenstellungen, sowie eine *chronologische Fallstudie* eines Probanden aus der Pilotierung (ist nicht in das Modell eingeflossen) erhalten. Er hat zunächst mit diesem Fall geübt, die Tabellen und das Programm zu verwenden. Im Anschluss sind offene Fragen geklärt worden und einzelne Aspekte, die beim Raten aufgefallen sind, diskutiert worden. Das eigentliche Interrating anhand der sechs *chronologischen Fallstudien* hat dann im

Tab. 8: Übereinstimmungswerte κ des Interratings zwischen Fachwissenwissenschaftler und Entwicklerin des Modells.

Fall	Übereinstimmung κ
Lea	1
Elisa	0,89
Irmgard	0,90
Adrian	1
Piet	1
Helmut	1

Anschluss stattgefunden.

10.1.2. Ergebnisse des Interratings

Die Ergebnisse des Interratings sind in Tabelle 8 dargestellt. Die Übereinstimmungswerte werden als Cohens κ-Werte angegeben (Döring und Bortz 2016).

Es zeigen sich gute bis sehr gute Übereinstimmungen bei den Einschätzungen der sechs Proband:innen zwischen den Codierungen durch den Fachwissenschaftler und durch die Entwicklerin des Modells. Dies liefert einen Hinweis dafür, dass das Modell eine hohe Passung zur Perspektive der Fachwissenschaft auf das Experimentieren aufweist. Der Fachwissenschaftler und die Entwicklerin des Modells unterscheiden sich in ihren Einschätzungen der Proband:innen kaum. Es kann also geschlossen werden, dass das Modell auch von Fachwissenschaftler:innen nach einer kurzen Schulung genutzt werden kann. Dieser Aspekt ist vor dem Hintergrund, dass Praktikumsleiter:innen und Betreuer:innen meist Fachwissenschaftler:innen sind, hinsichtlich der zukünftigen Nutzbarkeit von größter Bedeutung.

Eine nähere Analyse der abweichend eingeschätzten Passagen (n=2) zeigt, dass in beiden Fällen (**Elisa** und *Irmgard*) eine Diskrepanz zwischen den Facetten *Differenzierte Analyse* und *Differenzierte Analyse mit globalen Bezügen* auftritt. In beiden Fällen hat der Fachwissenschaftler erstere gewählt. In einem Gespräch zeigte sich, dass er hier jeweils einen Aspekt mehr erwartet hätte. Bei Elisa tritt die Diskrepanz in der Facette *Experimentelles Setup testen* auf. Hier wird vom Fachwissenschaftler angeführt, dass **Elisa** durch ein systematischeres Testen des experimentellen Setups hinsichtlich der unteren Frequenzbereiche eine bessere *Signalstabilität* hätte erreichen können. Diesem Einwand ist auf jeden Fall zuzustimmen. Jedoch wurde hier von der Entwicklerin des Modells die Facette *Differenzierte Analyse mit globalen Bezügen* gewählt, da *Elisa* durch ein systematisches Testen des Aufbaus über den gesamten Frequenzbereich mit besonderem Fokus auf die unteren

Frequenzen gezeigt hat, dass sie weiß, dass das für die Beantwortung der Fragestellung relevant ist, sodass hier auch die Vergabe der höchsten Ausprägungsstufe gerechtfertigt erscheint.

Die Diskrepanz der Einschätzungen bei **Irmgard** tritt bei der Facette *Experiment beurteilen* mit den gleichen Stufen auf. Der Fachwissenschaftler schätzt die Beurteilung des Experimentes wiederum als *Differenzierte Analyse* und nicht als *Differenzierte Analyse mit globalen Bezügen* ein. Hier ergab das nachfolgende Gespräch mit dem Fachwissenschaftler, dass *Irmgard* den Aspekt *Beurteilen der Auswertungsmethodik* ausgelassen hat, sodass hier nicht die höchste Qualitätsausprägung vergeben werden kann. Auch dieser Einwand ist gerechtfertigt. Die Facette *Differenzierte Analyse mit globalen Bezügen* ist hier von der Entwicklerin vergeben worden, weil *Irmgard* während der Auswertung mehrere Iterationen durchlaufen ist und dadurch ihr Vorgehen mit Blick auf die Fragestellung deutlich optimiert wurde, sodass hier die höchste Qualitätsausprägung gerechtfertigt erscheint.

Insgesamt lässt sich dazu festhalten, dass sich die objektive Einschätzung mehrerer Personen von komplexen Leistungssituationen immer als sehr herausfordernd darstellt. Mit Blick auf die Anzahl der getätigten Einschätzungen ergibt sich bei dem Interrating eine Übereinstimmung von $\kappa = 0{,}97$ zwischen den Einschätzungen der Performanz durch die Entwicklerin und durch den Fachwissenschaftler. Dies wird als sehr gutes Ergebnis hinsichtlich der Nutzbarkeit und Passung zur Perspektive der Fachwissenschaft gewertet und weist darauf hin, dass die Facetten der Dimensionen *Fachmethodik* und *Qualitätsausprägung* trennscharf formuliert sind. Weiterhin kann abgeleitet werden, dass das Modell zusammen mit den weiteren Materialien als Schulungsmaterial z. B. für Dozent:innen, die auf Basis des Modells Leistungsüberprüfungen gestalten möchten, genutzt werden kann. Das entwickelte Modell zusammen mit den abgeleiteten *handlungsorientierten Indikatoren* scheint praktikabel nutzbar zu sein. Die unterschiedlichen Einschätzungen bei den zwei Facetten sollten bei einer Erstellung eines Instrumentes zur Leistungseinschätzung experimenteller Performanz, basierend auf dem Modell, beachtet werden und nochmals geprüft werden, ob ähnliche Fälle bei weiteren Ratern auftreten.

10.2. Passung des Modells zur Perspektive der Praktikumsverantwortlichen - Expertenrating

Für die Prüfung des entwickelten Kompetenzstrukturmodells für das Experimentieren auf universitärem Niveau wird neben der Perspektive der Fachwissenschaft auch die Perspektive der Praktikumsleiter:innen deutscher Hochschulen sowie die der Betreuer:innen im Laborpraktikum an der Universität Paderborn einbezogen. Speziell die Prüfung dieser Perspektiven ist von besonderer Bedeutung, da

diese perspektivisch die Personengruppen sein werden, die das Modell für die Gestaltung und Evaluation der Lehrveranstaltung Laborpraktikum nutzen können. Für diese Prüfung des Modells ist eine Online-Umfrage erstellt worden. Ziel ist, die Einschätzung der Dozent:innen mit der Einschätzung der experimentellen Performanz anhand der entwickelten Dimension *Qualitätsausprägung* zu vergleichen. Im Folgenden wird zunächst die methodische Vorgehensweise inklusive der limitierenden Rahmenbedingungen (Kap. 10.2.1) vorgestellt. Daran schließt sich die Charakterisierung der Expert:innen (Kap. 10.2.2) und die Darstellung der Ergebnisse des Expertenratings (Kap. 10.2.3) an.

10.2.1. Methodische Vorgehensweise und Rahmenbedingungen

Im Folgenden werden zunächst die Rahmenbedingungen der Erhebung, die einen Einfluss auf die Gestaltung des Expertenratings besitzen sowie anschließend die formale und inhaltliche Gestaltung vorgestellt.

Das Expertenrating ist als Online-Umfrage gestaltet worden, da die Praktikumsleiter:innen über ganz Deutschland verteilt sind. Beim jährlichen Treffen der Praktikumsleiter:innen wurden das Projekt und das Expertenrating im Rahmen eines Vortrages vorgestellt und Fragen beantwortet. Im Anschluss haben die Praktikumsleiter:innen den Link zur Umfrage erhalten. Nach zwei Monaten und zweimaligen Erinnerungen per Email über die Mailingliste, in der die Praktikumsleiter:innen organisiert sind, ist deutlich geworden, dass keine angemessene Rücklaufquote mit den Praktikumsleiter:innen erreicht werden kann. Einige der Leiter:innen haben die Rückmeldung gegeben, dass ihnen die Durchführung des Expertenratings sehr schwer gefallen ist, weil sie selbst vor allem verwaltend tätig sind und nur noch selten selbst lehren. Es sind dementsprechend noch Betreuer:innen, die die entsprechende Expertise mitbringen, in die Stichprobe aufgenommen worden. Da die Betreuer:innen anderer Universitäten nur schwer zu erreichen sind,[79] sind nur die Betreuer:innen des Anfängerpraktikums der Universität Paderborn einbezogen worden.

Hinsichtlich des Umfanges wurde bedacht, dass die Praktikumsleiter:innen und Betreuer:innen nur wenig zeitliche Ressourcen haben, sodass die Umfrage nicht zu lang, jedoch ausführlich genug sein musste, um eine aussagekräftige Passungsprüfung durchführen zu können. Es ist dementsprechend nicht möglich gewesen, auf ökonomischem Weg den Expert:innen die Videos bereit zu stellen, was eine direkte Qualitätseinschätzung anhand der Performanz unterschiedlicher Proband:innen ermöglicht hätte. Zum einen ist es nicht zumutbar, dass die Expert:innen sich zwei bis vier Stunden Videomaterial ansehen, um die Performanz vor dem Hintergrund

[79] Traditionell werden Laborpraktika zu einem großen Teil durch Doktorand:innen betreut. Je nach Hochschulstandort machen sie dies jedoch nur für ein Semester.

des Gesamtprozesses einschätzen zu können. Weiterhin konnte keine zeitökonomische Schulung der Expert:innen zur Nutzung des Kompetenzmodells (wie beim Fachwissenschaftler) realisiert werden. Um dennoch die Einschätzungen der Expert:innen mit dem Kompetenzstrukturmodell abgleichen zu können, sind in der Online-Umfrage Teile der *chronologischen Fallstudien* genutzt worden.

Die Umfrage besteht strukturell aus zwei Teilen: *Personendaten* und ausgewählte *Handlungsbeschreibungen*, deren Qualität mittels Schulnoten eingeschätzt werden soll[80]. Aufgrund der großen Anzahl an Handlungsbeschreibungen sind drei Varianten der Umfrage erstellt und mittels Sonderzeichen benannt worden (s. u.). Bei den drei Varianten sind jeweils Auszüge der Handlungsbeschreibungen grob sortiert nach den Facetten des Kompetenzstrukturmodells enthalten.[81]

- Variante #: Physikalische Inhalte klären
- Variante %: Komponenten des Setups wählen, Messunsicherheiten und Messergebnisse bestimmen
- Variante &: Experimentelles Setup testen, Messplan ableiten, Experimentelles Setup bedienen, Experiment beurteilen

Die Expert:innen schätzten dementsprechend nur maximal Handlungen aus drei Facetten ein. Jede Variante erhielt eine eindeutige Bezeichnung, sodass auch eine mehrfache Durchführung möglich war. Den Expert:innen ist die jeweilige Variante per Zufallsprinzip zugeordnet worden. Sie konnten im Anschluss aber aufgrund der eindeutigen Benennung der Varianten eine der anderen beiden bearbeiten.

Jede Variante enthält eine Erhebung der personenbezogenen Daten, um die Gruppe der Expert:innen zu charakterisieren. Die Expert:innen machen dort Angaben zu folgenden Aspekten:

- Studiertes Fachgebiet
- akademischer Grad
- Typ der Hochschule
- Praktikumsart (Anfänger-, Nebenfach-, Fortgeschrittenen Praktikum)
- Rolle (Leitung, Betreuung)

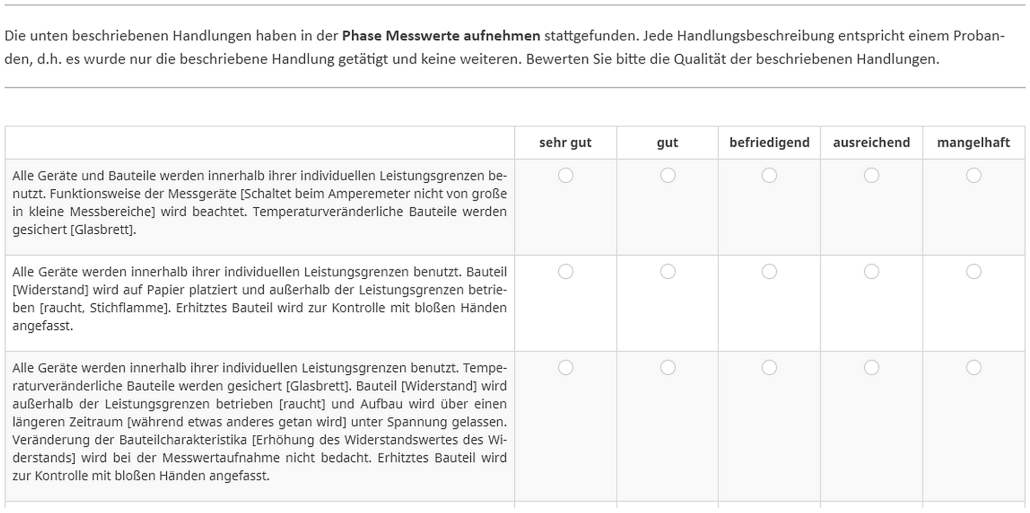
[80] Die Handlungsbeschreibungen können bei der Autorin angefragt werden.

[81] Zu dem Zeitpunkt der Erhebung der Umfrage waren die Facetten der Dimension Fachmethodik noch nicht final entwickelt, sodass es hier in der Benennung der gruppierten Handlungsbeschreibungen zu Abweichungen zum Modell kommt.

- Vorrangiges Fachgebiet der Student:innen im Praktikum
- Erfahrung (Dauer der Leitung/Betreuung im Praktikum)

Jede Variante enthält im zweiten Teil Auszüge von Handlungsbeschreibungen aus den *chronologischen Fallstudien* unterschiedlicher qualitativer Ausprägung. Die Handlungsbeschreibungen sind so gewählt, dass alle Facetten außer *Ergebnis beurteilen* repräsentiert werden. Die Handlungsbeschreibungen der Facette *Ergebnis beurteilen* sind nicht angemessen kürzbar gewesen und konnten somit zu Gunsten einer zeitökonomischeren Bearbeitung nicht integriert werden. Die Aufgabenstellung umfasst, dass die Handlungsbeschreibungen mit Schulnoten hinsichtlich der Qualität, die sie nach dem Absolvieren des Grundpraktikums erwarten würden, einzuschätzen. Hier ist weiter der Hinweis gegeben worden, dass jede Handlung einer Probandin bzw. einem Probanden entspricht und diese vollständig ist, d. h. in der Facette sind von der Person keine weiteren Handlungen vorgenommen worden. Schulnoten sind hier gewählt worden, da diese Skala auch in Laborpraktika noch sehr gängig ist, sodass hier vermutet werden kann, dass die Einschätzungen der Expert:innen nicht durch die Nutzung einer unbekannten Qualitätsskala beeinflusst werden. Um eine Passung der Schulnoten zum Modell zu erreichen, wird der Abgleich zum Modell dadurch realisiert, dass eine stufenweise Passung (nach Rängen, siehe unten) der beiden Einschätzungen überprüft wird.

In der Abbildung 34 wird für einen Eindruck der Gestaltung dieses Teils ein Auszug des Ratings gezeigt.



Die unten beschriebenen Handlungen haben in der **Phase Messwerte aufnehmen** stattgefunden. Jede Handlungsbeschreibung entspricht einem Probanden, d.h. es wurde nur die beschriebene Handlung getätigt und keine weiteren. Bewerten Sie bitte die Qualität der beschriebenen Handlungen.

	sehr gut	gut	befriedigend	ausreichend	mangelhaft
Alle Geräte und Bauteile werden innerhalb ihrer individuellen Leistungsgrenzen benutzt. Funktionsweise der Messgeräte [Schaltet beim Amperemeter nicht von große in kleine Messbereiche] wird beachtet. Temperaturveränderliche Bauteile werden gesichert [Glasbrett].	○	○	○	○	○
Alle Geräte werden innerhalb ihrer individuellen Leistungsgrenzen benutzt. Bauteil [Widerstand] wird auf Papier platziert und außerhalb der Leistungsgrenzen betrieben [raucht, Stichflamme]. Erhitztes Bauteil wird zur Kontrolle mit bloßen Händen angefasst.	○	○	○	○	○
Alle Geräte werden innerhalb ihrer individuellen Leistungsgrenzen benutzt. Temperaturveränderliche Bauteile werden gesichert [Glasbrett]. Bauteil [Widerstand] wird außerhalb der Leistungsgrenzen betrieben [raucht] und Aufbau wird über einen längeren Zeitraum [während etwas anderes getan wird] unter Spannung gelassen. Veränderung der Bauteilcharakteristika [Erhöhung des Widerstandswertes des Widerstands] wird bei der Messwertaufnahme nicht bedacht. Erhitztes Bauteil wird zur Kontrolle mit bloßen Händen angefasst.	○	○	○	○	○

Abb. 34: Screenshot der Online-Umfrage zum Expertenrating: Qualitätseinschätzung von Handlungen.

Am Ende jedes Blocks an Handlungsbeschreibungen sind in der Umfrage weiter-

hin Freitextfelder eingefügt worden, in welche die Teilnehmer:innen Hinweise oder Gedanken einfügen konnten.

10.2.2. Charakterisierung der Expert:innen

Das Expertenrating haben 24 Praktikumsleiter:innen deutscher Hochschulen (18 Praktikumsleiter:innen von Anfängerpraktika) und 13 Betreuer:innen der Universität Paderborn vollständig bearbeitet. Die Angabe einer Rücklaufquote stellt sich an dieser Stelle schwierig dar, weil unklar ist, wie viele Praktikumsleiter:innen in der Mailingliste organisiert sind. An dem Treffen der Praktikumsleiter:innen, bei dem das Projekt und Rating im Rahmen eines Vortrages vorgestellt und beworben wurde, haben 81 Personen teilgenommen.

Eine Übersicht über die charakterisierenden Merkmale der beiden Personengruppen ist in Tabelle 35 zu finden.

		Rating 1 (AG PP)	Rating 2 (UPB)
Anzahl Expertenratings		24	13
Studienfächer (Mehrfachnennung mögl.)	Physik	19	9
	Lehramt Physik	8	2
	Sonstiges	4	2
Promotion (abgeschlossen oder laufend)	Physik	16	11
	Didaktik der Physik	3	0
	keine Promotion	3	2
Aktueller akademischer Status	Master/Staatsexamen/Diplom	6	8
	Doktor:in	17	4
	Professor:in	1	1
Praktikumsart	Anfängerpraktikum	18	13
	Fortgeschrittenpraktikum	1	0
	Sonstige Praktika	5	0
Arbeitsort	Universität	21	13
	(Fach-)Hochschule	3	0
Funktion (Mehrfachnennung mögl.)	Praktikumsleitung	18	0
	Praktikumsbetreuung	19	13
Bisherige Arbeitsdauer	$<$ 1 Jahr	0	0
	1 - $<$ 2 Jahre	5	4
	2 - $<$ 5 Jahre	6	5
	5 - $<$ 10 Jahre	3	3
	$>$ 10 Jahre	8	0

Abb. 35: Übersicht über die Charakterisierung der Proband:innen des Expertenratings.

Aufgrund der großen Heterogenität der Merkmale zwischen den beiden Gruppen ist überprüft worden, ob dies die Einschätzungen der Handlungen mittels Noten beeinflusst hat. Dabei wurde angenommen, dass die beiden Stichproben unabhängig sind. Es wurde mittels exaktem zweiseitigen Mann-Whitney-U-Test (McKnight und Najab 2010) überprüft, ob zwischen dem *Akademischen Status*, der *Praktikumsart* und der *Funktion im Praktikum* und den beiden *Erhebungsgruppen* statistische Unterschiede auf Ebene der Qualitätseinschätzung der Handlungsbeschreibungen gefunden werden können[82]. Es konnten lediglich bei zwei von 90 Handlungsbeschreibungen signifikante Unterschiede[83] zwischen den Einschätzungen der Praktikumsleiter:innen und der Betreuer:innen der Universität Paderborn identifiziert werden. Diese Abweichungen in den zwei Handlungen sind jedoch

[82] Die vollständige Übersicht über die Rohdaten sowie über die Ergebnisse sind im Anhang A.6.1 zu finden.

[83] Die Signifikanzprüfung erfolgte aufgrund der intervallskalierten Werte mittels des Pearson Korrelationskoeffizient r (Döring und Bortz 2016).

vermutlich auf die unterschiedlichen Praktikumskonzeptionierungen der Universität Paderborn und der anderen Universitäten zurückführen, sodass diese beiden Handlungsbeschreibungen in der Gesamtstichprobe verbleiben.[84] Demzufolge können alle Expertenratings beider Gruppen in die Analyse einbezogen werden. Der trotz Erweiterung des Teilnehmerkreises weiterhin geringe Stichprobenumfang von 37 Teilnehmer:innen wird bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt.

10.2.3. Ergebnisse

Mittels der Ergebnisse des Expertenratings soll im Folgenden überprüft werden, wie hoch die Passung zwischen den Einschätzungen der qualitativen Ausprägung der qualitativ unterschiedlichen Handlungsbeschreibungen durch die Expert:innen (Praktikumsleiter:innen, Betreuer:innen) im Vergleich zur Einschätzung durch die Dimension *Qualitätsausprägung* des Kompetenzstrukturmodells ist.

Bevor über die quantitativen Ergebnisse berichtet wird, soll auf die Analyse der Freitextfeld-Rückmeldungen eingegangen werden, um die Interpretation der Ergebnisse zu rahmen. Die Analyse ergibt zwei wichtige Aspekte, die für die Interpretation der Ergebnisse relevant erscheinen.

Erstens ist viermal zurückgemeldet worden, dass durch die auszugsweise Bereitstellung der Handlungsbeschreibungen diese schwierig hinsichtlich der Qualität einzuschätzen sind, weil der Kontext des Gesamtprozesses fehle. Weiterhin ist angemerkt worden, dass die Umfrage trotz Bereitstellung in drei Varianten von ein paar Proband:innen als zu umfangreich wahrgenommen wurde. Hier ist zu vermuten, dass bei einigen Proband:innen die Konzentration während der Bearbeitung nachgelassen hat. Aufgrund dieser Aspekte wird das Expertenrating nur hinsichtlich der eingeschätzten qualitativen Rangfolge der Handlungen ausgewertet, sodass die konkrete Benotung von Handlungen weniger Einfluss besitzt. Weiterhin weisen diese Aspekte zusammen mit der geringen Rücklaufquote darauf hin, dass die Ergebnisse des Expertenratings nur tendenziell Hinweise auf die Passung der Expertenmeinungen im Kontrast zum Kompetenzstrukturmodell liefern können und damit keine absoluten Aussagen bezogen auf die Stichproben möglich sind.

Zweitens ist von den Teilnehmer:innen (Gruppe Praktikumsleiter:innen) dreimal darauf hingewiesen worden, dass Student:innen, die bestimmte (z. B. Theoretische

[84] Die beiden Handlungsbeschreibungen (S2 und S21) betreffen die Auswahl und Charakterisierung von Messgeräten (mittels Datenblätter), was in traditionellen Praktika typischerweise weniger intensiv im Praktikum behandelt wird als im Paderborner Konzept. Die Handlungsbeschreibungen können im Anhang A.6.1 eingesehen werden.

Grundlagen, Funktionsweise von Geräten, Sicherheitsregeln) nicht zu Beginn vorweisen, nicht am Praktikum teilnehmen können und dementsprechend diese Handlungen nicht in der Realität im Praktikum vorkommen würden. Dies ist aus Perspektive der Praktikumsleiter:innen eine berechtigte Einschätzung. Für die Entwicklung des Modells sind jedoch keine realen Situationen im Praktikum, von denen Dozent:innen zumeist Gruppen von Student:innen betreuen und somit die Student:innen von mehreren Seiten Hilfestellung erhalten, sondern es sind experimentierende Einzelpersonen analysiert worden. Es ist davon auszugehen, dass einzelne Handlungen, die deutlich kritisiert wurden (z. B. Anfassen heißer Bauteile ohne Handschuhe), auf die fehlende Begleitung zurückzuführen sind. Weiterhin ist zu vermuten, dass Student:innen anderer Hochschulen auf ähnlichem Expertiseniveau in dem Moment, in dem sie beim Experimentieren auf sich alleine gestellt sind, ähnliche Handlungsmuster zeigen, sodass die Handlungen nicht von der Analyse ausgeschlossen werden. Sie werden vielmehr als zu erwartende Handlungen unerfahrener Experimentierender eingeschätzt.

Die Auswertung der Daten erfolgt mittels SPSS in zwei Schritten. Zuerst werden auf Ebene der einzelnen qualitativ unterschiedlichen Handlungsbeschreibungen die Mediane der Einschätzungen der Expert:innen mit denen der Einschätzungen durch das Kompetenzstrukturmodell (Dimension *Qualitätsausprägung*) verglichen.[85] Der Vergleich der Mediane wird hier aufgrund der Ordinalskalierung der Datenlage gewählt. Ziel ist die Identifikation von Handlungsbeschreibungen, die eine Abweichung der qualitativen Einschätzungen von mehr als einer Stufe (zwischen Schulnote und Ausprägung) aufweisen. Insgesamt können drei von 89 Handlungsbeschreibungen innerhalb unterschiedlicher Facetten identifiziert werden, bei denen die Diskrepanz der Einschätzungen zwei Stufen bzw. 2,5 Stufen ausweisen aufweist.[86] Eine inhaltliche Analyse der Handlungsbeschreibungen zeigt, dass diese zum einen aufgrund der Beschreibung (Detailgrad) bzw. des fehlenden Kontextes des Gesamtprozesses als besonders schwierig einzuschätzen sind. Aufgrund des geringen Vorkommens solcher deutlichen Diskrepanzen zwischen den beiden Einschätzungen wird geschlussfolgert, dass die Passung zueinander als angemessen eingeschätzt werden kann. Die abweichenden Handlungsbeschreibungen werden bei der weiteren Analyse dennoch mit einbezogen, um die Heterogenität der Einschätzungen der Expert:innen realistisch abzubilden.

Im nächsten Schritt werden auf Facettenebene die Einschätzungen durch die Expert:innen und durch das Kompetenzstrukturmodell auf mögliche Korrelationen überprüft. Dazu werden je Facette die Ränge der Handlungsbeschreibungen zwischen Expert:innensicht und Modellsicht verglichen. Der Ansatz der Rang-

[85] Im Anhang A.6.2 sind die Rohdaten, Mediane und Einschätzungen durch das Modell vergleichend dargestellt.

[86] Die drei Handlungsbeschreibungen (I9, I12, S5) sind in der Datenübersicht im Anhang A.6.2 markiert und kommentiert.

korrelation wird hier aufgrund der zwei unterschiedlichen Qualitätsmaßstäbe (Schulnote - Modell) gewählt. Dazu wird der Spearmansche Rangkorrelatationskoeffizient ρ[87] genutzt, da mittels des Tests eine Überprüfung möglicher Korrelationen auf Ebene von Rängen realisiert werden kann und die beiden Variablen unabhängig voneinander sind. Dieses Vorgehen erscheint vor dem Hintergrund gängiger Bewertungsschemata plausibel. Für dieses Vorgehen spricht weiterhin die sehr deutliche Heterogenität der Einschätzungen durch die Expert:innen[88] sowie die Tatsache, dass in dem Expertenrating die Handlungen ohne ausführliche Darstellung des Gesamtprozesses eingeschätzt werden sollten. Es konnte gezeigt werden, dass die Einschätzungen (Expert:innen - Modell) einzelner Handlungsbeschreibungen im Vergleich zu anderen Handlungsbeschreibungen der Facetten besser oder schlechter eingeschätzt werden. Es wurden somit tendenzielle Übereinstimmungen hinsichtlich der grundsätzlichen Qualitätseinschätzungen identifiziert.

In der Abbildung 36 sind die Ergebnisse der beiden statistischen Verfahren gesammelt für alle Facetten sowie über alle Handlungsbeschreibungen dargestellt.

	Beschreibungen	Vergleich Modell mit Ratings		Ratings	
Facette	n	$n(Mdn \leq 1)$	$n(Mdn > 1)$	n	r_s
Inhalte klären	12	10	2	168	.70***
Komponenten auswählen	32	31	1	281	.73***
Experimentelles Setup testen	9	9	0	63	.81***
Messplan ableiten	5	5	0	35	.80***
Exp. Setup bedienen	22	22	0	286	.83***
Experiment beurteilen	10	10	0	90	.52***
Insgesamt	90	87	3	923	.70***

*** $p < .001$

Abb. 36: Übersicht über die Ergebnisse der Rangvergleiche zwischen Expert:innen- und Modelleinschätzungen inklusive der Angabe der Ergebnisse der Korrelationsanalyse.

Wie in der Übersicht (Abb. 36) zu erkennen, sind alle Spearman ρ Werte bezogen auf die Facetten größer als .5 und weisen somit starke Korrelationen auf. Das zweiseitige Signifikanzniveau ist mit $p \leq .001$ ebenfalls bei allen untersuchten Aspekten höchst signifikant. Auffällig ist hier die Facette *Experiment beurteilen*. Ähnlich wie bei der Facette *Messergebnis beurteilen*, die aus dem Rating herausgenommen wurde, wird hier deutlich, dass wahrscheinlich auch bei der Facette

[87] Der Pearsonsche Korrelationskoeffizient bot sich an der Stelle nicht an, weil die Daten nicht intervallskaliert sind. Es wurde dementsprechend Spearman-Rho genutzt, da hier nur Rang-Zusammenhänge geprüft werden.

[88] Die objektive Leistungsbewertung ist aufgrund unterschiedlicher Expertise und Qualitätsmaßstäbe immer eine Herausforderung. Gerade Schulnoten ohne weitere Definition der einzelnen Abstufungen führen hier bei mehreren Bewerter:innen zu großen Diskrepanzen.

Experiment beurteilen zu wenig Hinweise aus den vorherigen Facetten in die Handlungsbeschreibungen aufgenommen wurden, sodass den Expert:innen an einigen Stellen der Kontext des Gesamtprozesses fehlte.[89].

Insgesamt kann als Ergebnis dieser Analyse festgehalten werden, dass die Analyse der Mediane innerhalb der einzelnen Facetten zeigte, dass die Einschätzungen der Expert:innen im Mittel eine Passung zu den Stufen der Dimension *Qualitätsausprägung* aufweisen. Die Analyse der Korrelationen auf Facetten- und Gesamtprozessebene zeigte, dass die Ränge der Einschätzungen der Expert:innen mit der Einschätzung durch das Modell hinreichend übereinstimmen, d. h. die Experten-Reihenfolge stimmt mit der Modell-Reihenfolge überein. Es kann dementsprechend geschlussfolgert werden, dass die Stufung der Dimension *Qualitätsausprägung* grundsätzlich plausibel ist. Es bleibt jedoch zu überprüfen, wie Expert:innen videografierte, reale Handlungen mittels der Stufung der Dimension *Qualitätsausprägung* einschätzen würden.

10.3. Einordnung der Erkenntnisse in den fachdidaktischen Diskurs

In diesem Kapitel werden die Erkenntnisse dieses Projektes vor dem Hintergrund fachdidaktischer Befunde diskutiert. Dazu wird einerseits analysiert, wie plausibel die vorgeschlagene Modellierung der experimentellen Kompetenz auf universitärem Niveau vor dem Hintergrund schulischer Modelle erscheint (Kap. 10.3.2). Andererseits werden die identifizierten charakteristischen Merkmale universitären Experimentierens mit fachdidaktischen Befunden aus der Expertise- und Lehr-Lernforschung abgeglichen (Kap. 10.3.1). Dazu werden zunächst die zentralen Ergebnisse aus den vorangegangenen Analysen zusammengefasst und anschließend vor dem Hintergrund fachdidaktischer Theorien und Evidenzen diskutiert.

10.3.1. Charakteristische Merkmale universitären Experimentierens

Die vergleichende Analyse des schulischen Experimentierens (Kap. 2.2), des Experimentierens im Studium und des Experimentierens in der Forschung (Kap. 2.1) ergab, dass Student:innen bis zur Absolvierung der Qualifikationsarbeiten neben experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten auch ein für experimentelle Handlungen funktionales Wissenschaftsverständnis erwerben sollen. Aufgrund fehlender Forschungsarbeiten dazu stellte sich die Frage, wie sich diese beiden Bestandteile des universitären Experimentierens charakterisieren lassen. Dazu ist

[89] Dies wurde auch in den Freitextantworten zurückgemeldet.

eine Analyse des universitären Experimentierens mittels möglichst kontrastiver Fälle im Sinne von Experten-Novizen-Vergleichen unter Nutzung der *dokumentarischen Methode* erfolgt. Ziel war, handlungsgenerierende und -steuernde Aspekte von Expert:innen und Noviz:innen beim Experimentieren zu identifizieren. Dabei sollte insbesondere analysiert werden, inwieweit sich die experimentelle Vorgehensweise von Expert:innen, die im Laufe ihrer Ausbildung experimentelle Aufgabenstellungen, die sowohl im *context of justification*[90] als auch im *context of discovery* zu verorten sind, gelöst haben, von Vorgehensweisen von Noviz:innen, die in der Schule und im Studium vor allem Aufgabenstellungen, die dem *context of justification* zuzuordnen sind, unterscheiden. Die identifizierten charakteristischen Merkmale universitären Experimentierens werden im Folgenden vor dem Hintergrund fachdidaktischer Evidenzen diskutiert.

Die vergleichenden Analysen ergaben, dass Expert:innen beim Experimentieren fehlerfreier, jedoch nicht schneller als Fortgeschrittene oder Noviz:innen arbeiten (Kap. Charakterisierung der Stichprobe 9.1.1). Anhand der Analyse typischer Prozessmuster (Kap. 9.3.1.1) ist deutlich geworden, dass Expert:innen zeitlich zwar nicht schneller sind, jedoch deutlich mehr Handlungen pro Zeiteinheit absolvieren. Weiterhin ist deutlich geworden, dass anhand der Struktur der Prozessmuster (linear versus iterativ) kein eindeutiger Rückschluss auf den Expertisegrad von Personen getätigt werden kann. Die Expert:innen weisen zwar häufiger einen stark iterativen Prozessverlauf auf, d. h. sie wechseln häufiger bei der Bearbeitung zwischen unterschiedlichen Prozessschritten, während Noviz:innen eher linear arbeiten, jedoch zeigen auch Proband:innen, die für die Bearbeitung der experimentellen Aufgabenstellung keinen Ansatz finden, ein ebenfalls stark iteratives Vorgehen.

Beim Umgang mit herausfordernden Situationen im Experimentierprozess (Kap. 9.3.1.2) zeigt sich, dass Expert:innen elaboriertere Strategien sowohl bei der Analyse der Herausforderung als auch bei deren Lösung besitzen. Herausfordernde Situationen können im Verlauf des Experimentierprozesses an allen Stellen (Ableitung des funktionalen Zusammenhangs des physikalischen Phänomens bis zur Beurteilung von Messergebnissen, die nicht dem Erwarteten/Bekannten entsprechen) auftreten. Sie sind dadurch charakterisiert, dass die Situation mit bestehenden Wissensressourcen nicht aufgelöst werden kann und eine tiefer gehende Analyse zum Zusammenspiel mehrerer Faktoren erforderlich ist. Diese Analysen finden unter Zuhilfenahme von Strategien statt, die typischerweise in ähnlichen Situationen, die dem *context of discovery* zugeordnet werden, erworben

[90] Im Folgenden werden die Zuordnungen *context of discovery* und *context of justification*, obwohl diese nur in Bezug auf Erkenntnisprozesse innerhalb der Forschung, d. h. vor dem Hintergrund der kollektiven (sozialen) Prozesse der Forschung innerhalb der wissenschaftlichen Community, definiert sind, auf individueller Ebene genutzt. Lernen wird hier also als individueller Erkenntnisprozess verstanden. Dies soll eine bessere Anbindung an die Forschungslogik sowie eine präzisere Einschätzung und Unterscheidung der Struktur und Gestaltung experimenteller Aufgabenstellungen ermöglichen.

wurden. Die elaborierteren Strategien der Expert:innen sind durch ein systematischeres Vorgehen, das nicht wie bei Noviz:innen auf der Sichtebene beschränkt ist, z. B. lediglich Durchführung von Sichtkontrolle oder Anwendung von Alltagsheuristiken wie An- und Ausschalten gekennzeichnet. Stattdessen analysieren die Expert:innen zunächst systematisch das Zusammenspiel aller Geräte auf Ebene des Gesamtsystems und arbeiten sich danach durch Zerlegung des Messsystems in seine Einzelteile zu einer hypothetischen Lösung vor. Diese hypothetische Lösung testen sie im Anschluss unter Zuhilfenahme von Strategien, die sie durch Experimente, die dem *context of justification* zuzuordnen sind, erworben haben. Noviz:innen scheitern aufgrund fehlender Strategien häufiger bei der Analyse der Schwierigkeit beim Experimentieren und neigen eher dazu diese zu ignorieren und weiter zu experimentieren. Folglich scheinen Expert:innen von ihrer Erfahrung mit unterschiedlichen Problemklassen und Lösungsansätzen (*Problemschemata*) zu profitieren. Insbesondere die Fähigkeiten im Bereich des *abduktiven Schließens* (Kap. 2.1.2), die vermutlich anhand von Experimenten auf Forschungsniveau mit Situationen, die zum *context of discovery* zu zählen sind, erworben wurden, scheinen hier funktional zu sein. Diese Strategien ermöglichen eine flexiblere Herangehensweise an die herausfordernden Situationen. Sie können aufgrund der elaborierten *Problemschemata* zutreffendere Hypothesen zur Lösung der Schwierigkeit aufstellen (comprehend), begründen (refine) und diese elaborierter prüfen (check) und revidieren (discriminate).

Die elaborierteren Strategien, die aufgrund der Erfahrung mit diversen unterschiedlichen Problemklassen und Lösungswegen erworben wurden, werden von Experten als Routinen vollzogen. Dies wird auch anhand der Analyse der Stimulated Recall Interviews zum Aspekt *Einfluss von Erfahrung bzw. Intuition* (Kap. 9.3.1.3) deutlich. Expert:innen sprechen hier davon, dass sie beim Experimentieren von einer *Intuition* bzw. einem *Bauchgefühl* geleitet werden. Eine tiefer gehende Analyse zeigt, dass Expert:innen damit eigentlich Routinen bei der Anwendung von elaborierten Strategien und Wissensressourcen meinen[91]. Eine dieser Strategien, die Expert:innen anwenden, stellt die Prüfung von Messwerten hinsichtlich ihrer Plausibilität anhand eines Abgleichs von Größenordnungen, die sie im Kopf haben, dar. Diese Strategie hilft ihnen sowohl bei der Analyse der Komponenten des experimentellen Setups als auch bei der Prüfung von Messwerten im Sinne eines Kontrollmechanismus. Die Größenordnungen von Messwerten haben sie entweder über die Jahre ihrer Erfahrung durch Auseinandersetzung mit unterschiedlichen Experimenten gesammelt oder sie berechnen sich Größenordnungen durch das grobe Überschlagen anhand funktionaler Zusammenhänge (educated guess). Noviz:innen wenden diese Strategie nicht an und können dementsprechend meist nicht den Auslöser für herausfordernde Situationen identifizieren oder geeignete Strategien für die Lösung wählen. Fortgeschrittenen ist die Bedeutung dieser Strategie bewusst, jedoch besitzen sie aufgrund fehlender Erfahrung noch keine breite Übersicht an Größenordnungen und behelfen sich dementspre-

[91] Vergleiche hierzu auch die Analysen von D. Simon und H. Simon 1978.

chend mit Größenordnungen, die sie aus dem Alltag kennen oder investieren viel Zeit in das konkrete Ausrechnen möglicher Größenordnungen.

Weiterhin ist anhand der Analyse der Stimulated Recall Interviews (vgl. Kap. 9.3.1.3) deutlich geworden, dass Expert:innen einen verstärkten Fokus auf die Stabilisierung ihres Messsignals legen. Konkret bedeutet dies, dass sie die statistischen und systematischen Abweichungen ihres experimentellen Setups tiefgehend analysieren und versuchen, sie zu kontrollieren oder zu quantifizieren. Noviz:innen hingegen nennen meist pauschale Einflussfaktoren auf die Qualität von Messwerten. Dieser Unterschied ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass Expert:innen der Reproduzierbarkeit ihrer experimentellen Ergebnisse einen sehr hohen Stellenwert zuschreiben. Sie legen folglich einen hohen Wert auf eine transparente Darstellung ihres Experimentes (Vorgehen, Rahmenbedingungen) und auf eine möglichst große Kontrolle der Variablen. Noviz:innen und Fortgeschrittene hingegen erlernen diese Fähigkeiten erst und arbeiten dementsprechend die Anforderungen undifferenziert und linear ab. Die Dokumentation ist unvollständig und die identifizierten Messunsicherheiten werden eher pauschal angegeben.

Diese Erkenntnisse sind bei den weiteren Analysen der Tiefenstruktur der experimentellen Handlungen der Proband:innen weiter ausdifferenziert worden. Es konnten im Rahmen einer *relationalen Typenbildung* (Kap. 9.3.3) auf Basis zweier *sinngenetischer Typiken* (*Vernetzungsgrad* und *Zielorientierung*) unterschiedliche handlungsgenerierende und -steuernde Merkmale abhängig vom Erfahrungsstand der Proband:innen identifiziert werden (Kap. 9.3.2). Expert:innen zeigen beim Experimentieren eine höhere Differenziertheit in ihrem Vorgehen. Sie nutzen zur Strukturierung ihrer Handlungen mehr Wissensressourcen (technisch, physikalische, fachmethodisch). Sie verknüpfen diese elaborierter, was an tiefer gehenden Analysen des experimentellen Setups und der experimentellen Handlungen deutlich wird und kontrollieren ihre Vorgehen über den Gesamtprozess stärker (Metawissen). Letzteres zeigt sich dadurch, dass sie bei jedem Schritt den Gesamtprozess im Blick haben, um die experimentelle Fragestellung möglichst elaboriert (präzise und reproduzierbar) zu beantworten. Noviz:innen hingegen bewältigen den Prozess des Experimentierens eher mit Blick auf das Ergebnis, d. h. die Rahmenbedingungen, unter denen sie die Messwerte generieren sowie das Beurteilen dieser, stellen keinen Fokus dar. Sie nutzen weiterhin deutlich weniger unterschiedliche Wissensressourcen innerhalb der einzelnen Handlungsmuster. Hier ist zu beobachten, dass sie, wenn sie an schwierige Stellen im Experimentierprozess gelangen, jedoch deutlich differenzierter Experimentieren können. Diese Differenziertheit bei der Bearbeitung ist jedoch für sie noch keine Routine, sodass dies nur in Ausnahmefällen erfolgt. Die Fähigkeiten von Fortgeschrittenen können in das Kontinuum zwischen den beiden Extremausprägungen eingeordnet werden. Sie zeigen, dass sie die grundsätzlichen Anforderungen des Experimentierens kennen und diese auch mittels unterschiedlicher Wissensressourcen bewältigen können, jedoch geschieht dies eher im Sinne einer Checkliste, d. h. sie arbei-

ten die Schritte ab, können diese jedoch noch nicht tiefer gehend miteinander verknüpfen und analysieren. Anhand des Abgleichs der mündlichen Aussagen aus den Stimulated Recall-Interviews mit der Performanz durch das entwickelte Kompetenzstrukturmodell (Kap. 9.5.2) konnten hier jedoch Hinweise dazu gefunden werden, dass sie zwar oftmals über mehr Wissensressourcen verfügen, diese jedoch nicht handlungsfähig vorliegen.

Die Analyse der Fähigkeitsprofile aller Proband:innen mittels des entwickelten Kompetenzstrukturmodells (Kap. 9.5.1) liefert weiterhin Hinweise dazu, dass einzelne Student:innen im vierten Semester eine differenziertere experimentelle Performanz bei der Bewältigung von Aufgabenstellungen im *context of justification* aufweisen als eine Probandin mit Masterabschluss. Hier konnten anhand des Vergleichs der drei Gruppen (Expert:innen versus Student:innen mit fachmethodischem Praktikum versus Student:innen mit traditionellem Praktikum) erste Hinweise darauf gefunden werden, dass die systematische Förderung experimenteller Fähigkeiten und Fertigkeiten in einer geeigneten Lernumgebung das Fähigkeitsprofil der Lernenden im Vergleich zu der traditionellen Ausbildung mit ihren vorgegebenen Strukturierungen einen positiven Effekt besitzen kann.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass Expert:innen aufgrund ihrer Erfahrung mit unterschiedlichen Problemklassen und -lösungen, die sie anhand experimenteller Situationen mit sowohl entdeckendem als auch testendem Charakter erworben haben, deutlich differenzierter und kontrollierter experimentieren. Sie besitzen dementsprechend als innere Erzeugungsgrundlage für das Können verschiedene fachspezifische kognitive Strukturen. Dies kann u. a. auf die durch die Erfahrung mit diversen Situationen elaborierteren *Problemschemata*, die durch Anwendung auf unterschiedliche Situationen voneinander abgegrenzt und spezifiziert vorliegen, zurückgeführt werden. Weiterhin ist deutlich geworden, dass Expert:innen *prozessorientiert* experimentieren, d. h. sie analysieren beim Experimentieren alle beeinflussenden Aspekte, um Argumente für die Beurteilung der Qualität ihrer Messergebnisse zu gewinnen. Hier scheinen die wissenschaftlichen Prinzipien, wie *Sicherstellung der intersubjektiven Gültigkeit* oder *Reproduzierbarkeit*, die handlungssteuernden Elemente für den Gesamtprozess zu sein.

Es stellt sich nun die Frage, ob die in diesem Projekt identifizierten Merkmale universitären Experimentierens vor dem Hintergrund domänenunspezifischer und domänenspezifischer bzw. fachdidaktischer Evidenzen der Expertise- und Problemlöseforschung (Kap. 2.1)[92] plausibel sind.

[92] Eine Übertragung bzw. der Vergleich der Erkenntnisse scheint hier plausibel, auch wenn die Bearbeitung von Problemlöseaufgaben andere Fähigkeiten und Wissensressourcen benötigt. Während des Experimentierens werden regelmäßig Prozesse durchlaufen, die strukturell ebenfalls die Schritte *Problemrepräsentation*, *Erarbeitung Problemschemata*, *Ausarbeitung der Lösung* und *Lösungsevaluation* (vgl. Friege 2001) umfassen.

Grundsätzliche domänenunspezifische Merkmale von Expertise, wie Schnelligkeit, Fehlerfreiheit, elaborierte Vernetzung von Wissensressourcen usw., konnten hier auch für das Experimentieren nachgewiesen werden. Im Speziellen konnten Hinweise zu zwei noch weitestgehend unbeforschten Aspekten gefunden werden. **Erstens** zur Frage danach, welche strukturellen Unterschiede die Erfahrung beim Experimentieren auf die Performanz bewirkt und **zweitens**, welche Wissensressourcen des Metawissens die Selbstüberwachung bzw. Steuerung der Handlungen über den Gesamtprozess beeinflussen.

Bezogen auf den **ersten Aspekt** ist deutlich geworden, dass, wie auch beim Lösen von physikalischen Problemaufgaben, Expert:innen aufgrund ihrer Erfahrung[93] über erprobte Handlungsmuster, d. h. Problemschemata, bestehend aus Beispielsituationen und Lösungswegen, verfügen, welche sie abhängig von der Situation anwenden können. Ähnlich zum Modell zur Wissensentwicklung (Reimann 1998) scheinen hier Expert:innen auf Stufe III zu agieren, d. h. die für die Performanz funktionalen Wissensressourcen über Standardfälle und Abweichungen werden in Form von *Problemschemata* schrittweise elaborierter, indem sie zunehmend fallorientiert[94] systematisiert werden (vgl. Reinhold, Lind und Friege 1999). Die elaborierteren Wissensressourcen führen zu einem routinierten Handeln[95] beim Experimentieren in bekannten Situationen. Es ist ebenfalls deutlich geworden, dass alle Proband:innen inkl. der Expert:innen während des Experimentierprozesses an unterschiedlichen Stellen auf unbekannte Situationen stießen, die sie nicht mit Routinestrategien lösen konnten (vgl. u. a. Reinhold, Lind und Friege 1999, Larkin 1977). Diese Situationen stellten sich als besonders fruchtbar für die Analyse unterschiedlicher Ausprägungen des Könnens dar. Die Proband:innen mussten ihren bisherigen Ansatz für die Lösung der experimentellen Aufgabe grundlegend überdenken. Sie begannen folglich einen neuen individuellen Lernprozess, da sie ihre eigenen Grenzen überwinden mussten, weil bestehende Wissensressourcen ihnen keine Lösung für die Situation lieferten. Das Durchlaufen eines solchen Lernprozesses, bei dem die Aufgabenstellung keinen engen Rahmen setzt (wie es im vorliegenden Projekt der Fall ist), benötigt Kreativität bei dem Einsatz und ggf. bei der Adaption vorhandener Wissensressourcen. Mit Kreativität ist hier die möglichst effiziente Anpassung und Weiterentwicklung von bestehenden Wissensressourcen zu etwas *Neuem* gemeint. Da auch Expert:innen sich an solchen

[93] Hier wird Erfahrung nicht als generell (Gruber 1999), also durch Lernen und Biografie aufgebautes Können verstanden, sondern dem kognitionspsychologischen Ansatz mit Fokus auf die domänenspezifische Elaboration von Problemschemata durch fallbasiertes Lernen gefolgt (Reinhold, Lind und Friege 1999), die in Bezug auf die Theorie zur Wirkung von Wissen auf Können dem Ansatz des *strukturellen Unterschieds* und nicht dem *Transformationsansatz* zuzuordnen sind (siehe Kap. 2.5.1).

[94] Fallorientiert ist hier wie die prototypenorientierte Handlungssteuerung im Sinne der Theoriekonzeption *Subjektive Theorien* (Groeben u. a. 1988) als Ansatz zur Beschreibung der Wissenstruktur von Wissen II (Neuweg 2011) zu verstehen.

[95] Routiniertes Handeln, das vom Handelnden als intuitiv wahrgenommen werden kann, ist z. B. mittels des Konstruktes *Tacit-Knowing* (know-how), modellierbar (u. a. Patel, Arocha und Kaufman 1998, Schön 1983).

Stellen im *context of discovery* bewegten, können hier auf individueller Ebene Vergleiche zu den Kuhnschen Konzept der unterschiedlichen Wissenschaftsarten gezogen werden (vgl. 2.1). Die Experimentierenden befinden sich an Punkten, an denen sie etwas für sich Neues entdecken bzw. untersuchen, sodass sie hier ggf. individuelle Paradigmenwechsel innerhalb ihrer kognitiv systematisierten Wissensressourcen durchlaufen. Hier konnten erste Hinweise dazu gefunden werden, dass sich die Strategie des abduktiven Schließens (Krüger und Upmeier zu Belzen 2021), d. h. die hypothetische Annahme eines erfolgversprechenden Lösungsansatzes für eine unbekannte Situation (*context of discovery*), für die Beschreibung und Systematisierung experimenteller Performanz in Situationen mit hohem Kreativitätsanteil bewährt.

Auch die identifizierten Merkmale der experimentellen Performanz von Noviz:innen und Fortgeschrittenen decken sich mit fachdidaktischen Evidenzen der Expertise- und Problemlöseforschung. Es konnten Hinweise dazu gefunden werden, dass die Organisation der Wissensressourcen bei Noviz:innen eher den Charakter von Einzelelementen und linearen Verknüpfungen (Stufe I (Reimann 1998)) aufweist. Auch wird während des Prozesses eher die Sichtebene als die Tiefenstruktur analysiert. Aufgrund der wenig elaborierten *Problemschemata* ist es für Noviz:innen und Fortgeschrittenen sehr herausfordernd, die notwendigen experimentellen Handlungen festzulegen. Dafür spricht, dass die Proband:innen die dafür notwendigen Wissensressourcen in den Stimulated Recall Interviews (vgl. Kap. 9.5) zwar verbalisieren konnten[96], diese jedoch in der Experimentiersituation nicht nutzbar, also handlungsunfähig bzw. träge (vgl. Definition träges Wissen nach Lind und Friege 2003)[97] vorlagen. Dies führt dazu, dass Noviz:innen und Fortgeschrittene so lange auf bewährte generische Heuristiken (Sammlung von Faustregeln (Gruber 1999): z. B. Aufnahme von 10 Messwerte[98], die ohne fachspezifische Wissensressourcen, Strategien und Fähigkeiten auskommen), zurückgreifen, bis diese nicht mehr *gefühlt*[99] funktional sind. Dies konnte z. B. beim Umgang mit herausfordernden Situationen in Bezug auf die Nutzung von generischen Heuristiken (z. B. An-Ausschalten) oder anhand des Ignorierens der Herausforde-

[96] Da in diesem Projekt nur Hinweise zu möglichen der Performanz zugrunde liegenden Dispositionen identifiziert werden können, kann hier keine Aussage dazu gemacht werden, ob die Proband:innen in den Stimulated Recall Interviews ihre Wissensressourcen oder eine nachträgliche Begründungsrekonstruktion (Neuweg 2011) verbalisiert haben. Es erscheint jedoch vor dem Hintergrund, dass nach möglichen Vorgehensweisen unabhängig von der Situation gefragt wurde, plausibel, dass die hypothetisch zu durchlaufenden Schritte beim Experimentieren auf Basis von deklarativen Wissensressourcen von den Proband:innen verbalisiert wurden.

[97] Träges Wissen liegt dann vor, wenn kognitive Wissensressourcen beim gewollten Bewältigen einer Anforderung nicht handlungswirksam vorliegen (vgl. *Strukturdefizitserklärung*, Lind und Friege 2003.

[98] Heinicke kategorisiert solche (Faust-)Regeln in ihrer Studie zu Messunsicherheiten in Experimenten als *formal-theoretisch* (Heinicke 2012).

[99] Während Lehrende bei Lernenden sehr schnell nicht funktionale Herangehensweisen identifizieren können, ist dies bei Lernenden meist erst der Fall, wenn sie eine Situation nicht mehr bewältigen können, aber für die Bewältigung der Anforderungen lösen müssen.

rung beobachtet werden. Hier kann vermutet werden, dass die Noviz:innen und Fortgeschrittenen noch nicht ausreichend viele Situationen durchlaufen haben, sodass es ihnen noch nicht gelingt, eine höhere Abstraktionsebene zu erreichen, um so Ähnlichkeiten zwischen experimentellen Situationen wahrnehmen und ein geeignetes *Problemschemata* abrufen zu können (vgl. u. a. Reinhold, Lind und Friege 1999). Vielmehr scheinen hier sehr stabile Heuristiken verwendet zu werden, die vermutlich auf die Gestaltung der experimentellen Lernumgebungen mittels kleinschrittiger Anleitungen in Schule und traditionellen Laborpraktika zurückzuführen sind. Diese erschweren den Zugang zu fachspezifischen Handlungsressourcen und begünstigen den Erwerb generalisierter, fachunabhängiger Heuristiken, weil sie keinen Raum für das Durchdenken bzw. Verstehen der Situation lassen bzw. auslösen (u. a. Heinicke 2012, Holmes, Wieman und Bonn 2015). Oder anders formuliert, die Lernenden hantieren mit den experimentellen Materialien (hands-on) und reflektieren dabei nicht ihre Vorgehensweise bzw. bestimmen nicht selbst die Struktur des Prozesses (minds-off) (Tesch und Duit 2004).

Bezogen auf den anhand der vorangegangenen Analysen identifizierten **zweiten Aspekt**, welche Wissensressourcen des Metawissens die Selbstüberwachung der Experimentierenden bzw. die Steuerung der Handlungen über den Gesamtprozess beeinflussen, konnten Hinweise gefunden werden, welche Wissensressourcen abhängig vom Ausbildungsstand (Experten-Novizen-Vergleich) auf Ebene des Gesamtprozesses handlungsgenerierend und -steuernd wirken.

Die vergleichenden Analysen zur sinngenetischen Typik *Zielorientierung* in Bezug auf den Gesamtprozess (Kap. 9.3.2.2) zeigten, dass Expert:innen während des Experimentierprozesses in den einzelnen logischen Sinnabschnitten (vgl. Kap. 9.2, Facetten, Subfacetten) mehr Aspekte untersuchen, ihre Handlungen aufeinander abstimmen und dabei umfangreiche Argumente für die Einschätzung der Qualität ihrer Ergebnisse sammeln. Diese Orientierung zeigten sie stabil in allen Handlungsmustern im gesamten Prozess. Handlungsgenerierend und -steuernd scheinen dabei Strategien und Wissensressourcen, basierend auf grundlegenden Prinzipen der Wissenschaft, zu sein. Die differenzierte Analyse aller Aspekte des Experimentierprozesses sowie die Dokumentation dieser stellen sicher, dass die bestimmten Messergebnisse multidimensional hinsichtlich ihrer Gültigkeit beurteilt werden können und dass eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse möglich ist. Hierzu gehören Strategien, wie z. B. die Bestimmung oder das Nachschlagen von Referenzwerten oder die Analyse von systematischen und statistischen Abweichungen. Noviz:innen hingegen streben die Generierung eines Zahlenwertes an. Fortgeschrittene zeigen erste Hinweise dafür, dass sie um die Prinzipen der Wissenschaft wissen. Diese wirken allerdings nur punktuell und unvollständig handlungsgenerierend, da die notwendigen fachspezifischen Wissensressourcen noch nicht funktional für das Handeln vorliegen. Die beschriebenen experimentellen Wissensressourcen weisen Ähnlichkeit zum Prozessschritt *Evaluation der*

Lösung beim physikalischen Problemlösen (Reinhold, Lind und Friege 1999, Friege 2001) auf. Auch bei diesem Schritt müssen geeignete Strategien zur Überprüfung der Plausibilität des Ergebnisses angewendet werden. Dazu wird von Reinhold et al. schon damals angemerkt, was bis heute gültig ist, dass dieser Prozessschritt bisher kaum tiefer gehend untersucht wurde. Die Zuschreibung einer "besonderen Fähigkeit zur Selbstkontrolle des Problemlöseprozesses" (Reinhold, Lind und Friege 1999, S. 54) sei nicht evidenzbasiert fundiert, sondern beruhe eher auf Plausibilitätsüberlegungen. Diese Wissensressourcen zeigen weiterhin Überschneidungen zu der Modellierung des *konditionalen Wissens*, das z. B. im Bereich der Modellierung von Professionswissen von Lehrenden zusammen mit deklarativem und prozeduralem Wissen modelliert wird (Tepner u. a. 2012)[100]. Unter *konditionalem Wissen* wird "das Wissen über Bedingungen, unter denen eine Entscheidung bzw. eine Handlung angemessen ist" (Tepner u. a. 2012, S. 17), verstanden. Weiterhin umfasst es das für die Planung und Begründung von Prozessen und Handlungen (wann, warum) relevante Wissen. Leutner et al. spezifizieren diese Definition, um die Verfügbarkeit und die Anwendung von allgemeinen Problemlösestrategien (Suche nach relevanten Informationen, alternativen Problemrepräsentationen oder Teilzielen) sowie um Fähigkeiten der Selbstregulation, "[...] um Problemlöseprozesse zu planen, zu überwachen, zu bewerten und gegebenenfalls zu modifizieren." (Leutner u. a. 2012, S. 36).

Einen ähnlichen Ansatz wählte auch Heidrich (2017) bei der Analyse der Performanz von Student:innen im Inhaltsbereich Optik. Er hat im Gütemaß *Strukturiertheit* vor allem übergeordnete kognitive Prozesse, wie *reflektiertes Handeln*, *Selbstreflexion* und *konzeptuelles Wissen*, die bei der (Aus)Wahl der nächsten Handlung relevant werden sollen, integriert. Er legte in dem Maß Aspekte, wie *Idealtypische Abfolge*, *Kontrolle* und *Fehlerkorrektur*, bezogen auf einzelne Experimentierphasen als Qualitätsmerkmale fest. Im weiteren Gütemaß Zielorientierung, das sich bei ihm auf den Gesamtprozess bezieht, wird die Anzahl benötigter Experimentier-Zyklen (Heidrich 2017, S. 30) einbezogen. Diese Trennung der Wissensressourcen, bezogen auf den Gesamtprozess bzw. auf einzelne Phasen im Prozess, wird jedoch dem charakteristischen Merkmal der Zielorientierung, die der strategischen Ausrichtung aller Handlungen auf ein dem Gesamtprozess übergeordneten Ziel entspricht (Leutner u. a. 2012), nicht gerecht.[101]

Die Metastrategien, die Heidrich nutzt, sind eher den Handlungskompetenzen bzw. der Selbstregulation zuzuordnen und damit eher als generisch und nicht fachspezifisch einzuordnen. Die Fachspezifität der Metastrategien zeigte sich bei den Analysen in diesem Projekt vor allem bei den Expert:innen und Fortge-

[100] Alternativ wird auch reflektives Wissen, das jedoch nicht in der Situation sondern retrospektiv wirkt, genutzt (Tepner u. a. 2012).

[101] Dies reflektiert er auch ansatzweise auf Basis seiner Ergebnisse und kommt zum Schluss, dass das vor allem beim Gütemaß der Strukturiertheit die Intentionen bei Handlungsübergängen deutlich mehr in den Fokus rücken muss (Heidrich 2017, S. 333).

schrittenen bei der konkreten Wahl der Strategien zur Gestaltung des Experimentierprozesses. Mit fortschreitender Expertise ist folglich davon auszugehen, dass Experimentator:innen aufgrund ihrer Erfahrung über eine große Anzahl von Beispielproblemen, wie z. B. welche Aspekte müssen durchdacht werden, um möglichst passgenau zur Zielsetzung Messwerte aufnehmen zu können, verfügen. Es ist zu vermuten, dass der Einsatz generischer Strategien, wie es bei den Noviz:innen beobachtet wurde, mit zunehmender Erfahrung sinkt. Damit sind zwar die grundsätzlichen strategischen Mechanismen der Zielorientierung als generisch, jedoch die konkrete Wahl und Kontrolle der Strategien als fachspezifisch anzusehen. Eine Trennung der beiden Fähigkeitskonstrukte experimentelle Performanz und Metastrategien schien hier anders als bei Tepner et al. (2012) oder Heidrich (2017) nicht funktional, da beide sehr eng miteinander verknüpft und daher bei einem Modell mit Performanzorientierung nicht trennscharf modelliert werden können.

Abschließend sollen die hier identifizierten charakterisierenden Merkmale mit einem Rahmenmodell für das Experimentieren auf universitärem Niveau (Modelling Framework for Experimental Physics), das basierend auf dem Zielkatalog von Zwickl et al. (2013)[102] entwickelt und von Dounas-Frazer et al. 2018 weiter entwickelt wurde (siehe Abb. 37), verglichen werden. Es wird deutlich, dass hinsichtlich der grundlegenden Aspekte eine hohe inhaltliche Übereinstimmung zu den identifizierten charakteristischen Merkmalen universitären Experimentierens vorliegt. So trennt auch der Modelling Framework bei der Vorgabe der zu absolvierenden Schritte das Messsystem und das physikalische System. Weiterhin liegt auch bei dem Modell der Fokus auf der Beurteilung der Gültigkeit von Messergebnissen und damit auf der Konsistenz des Gesamtprozesses. Nimmt man hinzu, dass der Modelling Framework von Fachphysiker:innen entwickelt wurde, kann dies als weiterer Hinweis dazu gewertet werden, dass das entwickelte Modell eine hohe Passung zu den Anforderungen universitären Experimentierens aufweist.

[102] Der Zielkatalog stellt die Grundlage für die jüngste Erhebung der Zielsetzungen deutscher Laborpraktika dar (Nagel und Oppermann 2018b, siehe Kap. 2.3.1).

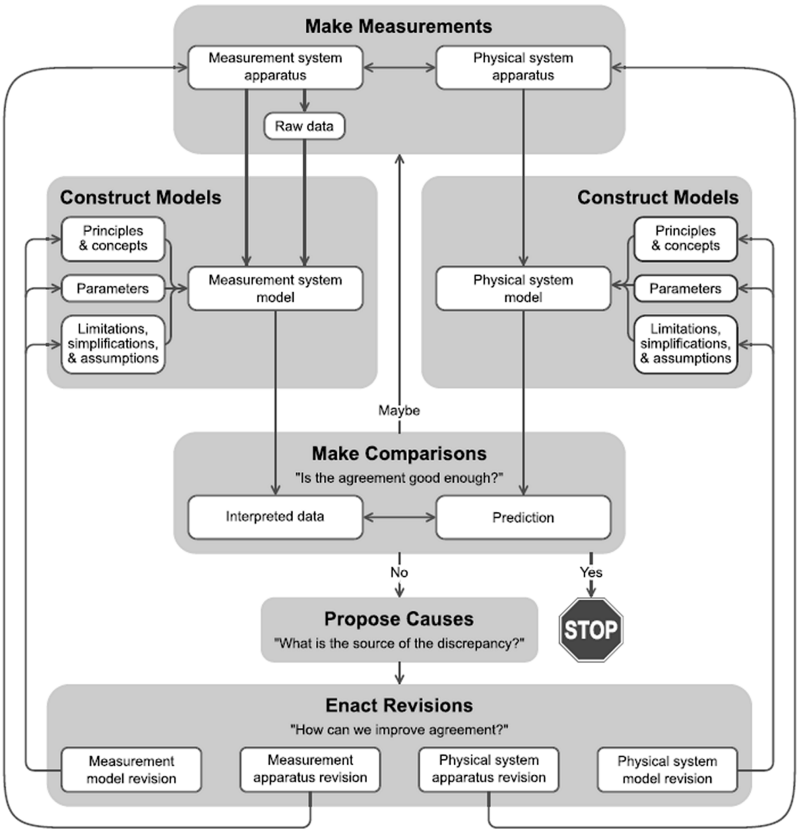


Abb. 37: Modelling Framework for Experimental Physics Dounas-Frazer und Lewandowski 2018 (Is adapted from a visualisation originally developed by Zwickl et al (2014). CC-BY 3.0.)

Insgesamt kann festgehalten werden, dass die identifizierten charakteristischen Merkmale der experimentellen Performanz auf universitärem Niveau vor dem Hintergrund fachdidaktischer Evidenzen plausibel erscheinen. Auf Basis dieser Erkenntnisse stellt sich die Frage danach, wie experimentelle Lernumgebungen aussehen sollten, die den Erwerb elaboriert ausgebildeter Fähigkeiten für die Erzeugung von Können ermöglichen. Ein erster Hinweis darauf kann durch den Vergleich der unterschiedlichen Gruppen in diesem Projekt abgeleitet werden. Die Student:innen, die nur das Laborpraktikum mit fachmethodischem Schwerpunkt absolviert haben, in dem sowohl testende, als auch entdeckende Experimentiersituationen implementiert sind, weisen elaboriertere Fähigkeitsprofile als die Student:innen auf, die das traditionelle Praktikum besucht haben[103].

[103] Eine konkretere Beschreibung möglicher Gestaltungsprinzipien wird ausblickend im Kapitel 11.2.2 diskutiert.

10.3.2. Einordnung der Kompetenzmodellierung in den fachdidaktischen Diskurs

In diesem Projekt ist deskriptiv auf Basis der Analyse experimenteller Handlungen unterschiedlich fähiger Proband:innen der Vorschlag für ein performanzorientiertes Kompetenzstrukturmodell auf universitärem Niveau entwickelt worden. Aufgrund fehlender wissenschaftspsychologischer Arbeiten im Bereich des Experimentierens konnte dafür auf keine bestehenden Modellierungen zurückgegriffen werden. Stattdessen sind als Grundlage für die Modellierung zunächst das Experimentieren in der Forschung auf Basis wissenschaftspsychologischer Arbeiten, das Experimentieren in Schule und im Studium auf Basis normativer Vorgaben und punktueller Evidenzen theoretisch analysiert worden.

Die Modellierung experimenteller Kompetenz ist zwar für den schulischen Bereich schon weit fortgeschritten, jedoch kann diese aufgrund der unterschiedlichen Bildungsansprüche von Schule und Universität nicht übernommen werden. Eine a priori Modellierung war weiterhin aufgrund fehlender fundierter Zielsetzungen für Laborpraktika nicht möglich. Jedoch konnte für die Systematisierung experimenteller Fähigkeiten auf die methodische Vorgehensweise beim Modellieren von Kompetenzen auf Erkenntnisse aus der Forschung für den schulischen Bereich zurückgegriffen werden. Die auf Basis der theoretischen Grundlagen abgeleiteten methodischen Schritte für die Entwicklung des deskriptiven Modells auf Basis einer gegenstandsnahen Datengrundlage (experimentelle Aufgaben mit typischen Problemtypen) stellte sich als funktional dar. Es konnte ein dreidimensionales Kompetenzstrukturmodell, durch das anhand der Performanz Rückschlüsse auf die zugrunde liegenden kognitiven Dispositionen gezogen werden können, realisiert werden. Dazu sind nach der Entwicklung der Dimensionen *Fachmethodik* und *Qualitätsausprägung* handlungsorientierte Indikatoren identifiziert worden, die eine Zuordnung einer qualitativen Ausprägung zu experimentellen Fähigkeiten im Sinne von Niveauindikatoren ermöglichen.

Im Folgenden werden die Dimensionen *Fachmethodik* und *Qualitätsausprägung* vor dem Hintergrund von Evidenzen und Modellen aus dem schulischen Bereich hinsichtlich der Plausibilität diskutiert.

Die Dimension *Fachmethodik*, in der die experimentellen Fähigkeiten systematisiert worden sind, weist eine hohe Deckung zu schulischen Modellen auf. Dies ist vor dem Hintergrund, dass das hier entwickelte Modell anders als schulische Kompetenzmodelle, die typischerweise normativ entwickelt werden, deskriptiv entstanden ist, überraschend. Es war zu erwarten, dass sich die Facetten der Dimensionen deutlich unterscheiden. Ein Vergleich z. B. mit den Kompetenzstrukturmodellen von Schreiber (2012) oder Maiseyenka (2014) (Kap. 2.5.2.3, Abb. 5), die nicht nur kognitive, sondern auch handlungsorientierte Fähigkeiten beachten, zeigt, dass die Facetten dieser Dimension bis auf eine Ausnahme näherungswei-

se deckungsgleich sind.[104] Die grundlegenden experimentellen Fähigkeiten in Form der modellierten Facetten und Subfacetten sind inhaltlich vergleichbar und lediglich stellenweise unterschiedlich sortiert und zusammengefasst. Dies ist vor dem Hintergrund, dass in der Schule typische Phasen des Experimentierprozesses nachvollzogen werden sollen, um die Genese von Forschungsdaten sowie deren Gültigkeit bzw. Limitationen (vor allem Kompetenzbereich *Erkenntnisgewinnung*) nachvollziehen zu können, plausibel. Die Abweichung zu den schulischen Modellen ist bei der Facette Datenaufbereitung (Rohdaten aufbereiten und Berechnungen anstellen) zu finden. Diese ist für das universitäre Modell nicht als eigenständige experimentelle Fähigkeit modelliert worden (Kap. 9.3.3.2). Im entwickelten Kompetenzstrukturmodell auf universitärem Niveau ist die Festlegung der Auswertungsmethodik als eigentliche Herausforderung beim Experimentieren identifiziert worden und als Subfacette in die Komponente *Physikalische Inhalte klären* aufgenommen worden. Die eigentliche Durchführung der Datenaufbereitung bzw. der Datenberechnungen (rechnerisch oder grafisch) erfolgt auf universitärem Niveau nach mathematischen Standardverfahren. Diese Verfahren, die vor allem mathematische Fähigkeiten benötigen, müssen natürlich erlernt werden, jedoch sind sie in der Anwendung nicht flexibel, sondern ergeben sich aus der festgelegten Auswertungsmethodik zu Beginn des Experimentes, sodass hier eine Stufung in der Ausprägungsqualität nicht realisierbar war.

Ein Vergleich der Facetten und Subfacetten sowie der identifizierten handlungsorientierten Niveauindikatoren (Kap. 9.3.3.2) mit theoretisch festgelegten und durch Expert:innen angereicherten wünschenswerten experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten von Zwickl et al (2013) zeigt eine hohe Passung sowohl hinsichtlich der Sortierung als auch bezogen auf die Facetten und Subfacetten. Die Zielsetzungen von Zwickl et al. sind auch in der Community der deutschen Praktikumsleiter:innen stark rezipiert worden, sodass hier eine hohe Passung der Dimension *Fachmethodik* zur Perspektive der Praktikumsleiter:innen vermutet werden kann.

Grundsätzlich kann also festgehalten werden, dass die deskriptiv entwickelten Facetten der Dimension *Fachmethodik* vor dem Hintergrund empirischer und theoretischer Evidenzen und Modellierungen als plausibel eingeschätzt werden können.

Die Dimension *Qualitätsausprägung* soll anhand der Performanz einen Rückschluss auf die kognitive Prozessqualität ermöglichen. Anders als bei schulischen Kompetenzmodellen konnte hier nicht auf normative Vorgaben, wie z. B. Zielerreichungsgrade in Bezug auf den Studienfortschritt, zurückgegriffen werden. Auch eine Festlegung von Zielsetzungen ist nicht möglich gewesen, da bisher keine

[104] Für die schriftliche Darstellung dieses Projektes werden nur diese beiden Modelle exemplarisch herangezogen. Weitere Modelle zur experimentellen Kompetenz sind ebenfalls sehr ähnlich strukturiert (vgl. Kap. 2.5.2.3).

didaktisch fundierten, sondern nur von Fachwissenschaftler:innen tradierte Zielsetzungen existieren (vgl. Kap. 2.3.1). Weiterhin sind Strategien aus dem schulischen Bereich zur Festlegung von Zielsetzungen, z. B. bei der Entwicklung der ersten schulischen Curricula mittels umfassender Delphi-Umfragen (Häußler u. a. 1988), im Rahmen dieses Projektes nicht möglich gewesen. Das Übernehmen von Dimensionen aus schulischen Modellen, die kognitive Anforderungen (z. B. kognitive Anforderungen (Schecker und Parchmann 2006) oder Vernetzung (Kauertz 2008)) modellieren, war aufgrund des unterschiedlichen Bildungsanspruchs von Schule und Universität nicht möglich. Aufgrund der theoretischen Analyse des Experimentierens auf universitärem Niveau ist deutlich geworden, dass die Prozessqualität beim Experimentieren an der Universität durch eine höhere Komplexität und elaboriertere kognitive Prozesse beeinflusst wird, sodass die Modellierung der Dimensionen *Qualitätsausprägung* über die Performanz unterschiedlich fähiger Proband:innen deskriptiv realisiert wurde. Dazu wurde durch kontrastive Vergleiche das jeweils Typische der experimentellen Handlungen (im Speziellen die handlungssteuernden und -generierenden Dispositionen (siehe Kap. 10.3.1)) unterschiedlich fähiger Proband:innen identifiziert und ausgeschärft. Die Systematisierung erfolgte über sinngenetische und relationale Typenbildung. Dabei wurden die beiden qualitätsgenerierenden Typiken *Zielorientierung* und *Vernetzungsgrad* gemeinsam in einer Dimension modelliert, da das für die Steuerung des Gesamtprozesses notwendige Metawissen sowie die Differenziertheit des Experimentierprozesses über den Vernetzungsgrad auf Performanzebene nicht trennbar sind (vgl. Kap. 10.3.1).

Für die Systematisierung der qualitativen Ausprägung der Performanz ist auf das Konzept der *hierarchischen Komplexität* (Commons) zurückgegriffen worden. Die Stufenbeschreibungen der Qualitätsausprägungen weisen dementsprechend auch eine hohe Ähnlichkeit zur Modellierung von schwierigkeitserzeugenden Merkmalen physikalischer Leistungstestaufgaben (Kauertz 2008) auf. Diese a priori Modellierung der innerhalb von Testsituationen zu bewältigenden Anforderungsstufen wird im schulischen Bereich für die Operationalisierung naturwissenschaftlicher Fähigkeiten und Fertigkeiten im Rahmen von Large-Scale-Untersuchungen genutzt. Die theoretische Grundlage dieser Modellierung geht auf systemtheoretische Überlegungen zurück. Komplexität wird demnach über "[...] die Anzahl und Ähnlichkeit ihrer Elemente sowie die Anzahl und Dichte der Verknüpfungen definiert." (Kauertz 2008, S. 38). Dies wird von Kauertz (2008) übersetzt in die Stufung *Fakt - Fakten - unverbundene Zusammenhänge - verbundene Zusammenhänge - übergeordnetes Konzept*. Da diese Stufung für die Zuweisung von Qualitätsüberlegungen zu gezeigter Performanz nicht funktional ist, ist in diesem Projekt die Stufung der Dimension über die Differenziertheit realisiert worden. Die Zuschreibung der Qualitätsausprägung basiert auf dem Grad der Vernetzung handlungsorientierter Niveauindikatoren (Kap. 9.3.3.2) mit den fachmethodischen Subfacetten (vgl. Tab: 7 in Kap.9.3.3.2) und somit indirekt auf einer Komplexitätsstufung.

Diese Systematisierung erscheint aus zweierlei Gründen plausibel. Erstens wird theoretisch angenommen, dass Wissen in Form von propositionalen Netzwerken organisiert wird (u. a. Schnotz 1994). Dementsprechend ist die Annahme, dass der Grad der Vernetzung einzelner Komponenten dieser Netzwerke ein Qualitätsmerkmal darstellt, plausibel (u.a. Woitkowski 2015). Zweitens konnten in fachdidaktischen Studien zu Lernpfaden bzw. *learning progressions*, in Bezug auf das Erlernen eines physikalischen Begriffsverständnisses, Hinweise gefunden werden, dass auch die Entwicklung von Fähigkeiten und Fertigkeiten durch eine schrittweise Elaboration von Wissensressourcen durch Verdichtung des Wissens sowie eine Steigerung des Abstraktionsgrades geschieht (u. A. C. v. Aufschnaiter 2003, Saniter 2003).

Weiterhin ist die Modellierung der Dimension *Qualitätsausprägung* im Rahmen eines Expertenratings (Kap. 10.2) Praktikumsleiter:innen und Betreuer:innen vorgelegt worden, um zu überprüfen, ob aus Expert:innensicht die Stufung plausibel ist. Die Ergebnisse des Expertenratings zeigen, dass die durch das Modell zugewiesenen qualitativen Einschätzungen der experimentellen Handlungen eine hohe Passung zu den Einschätzungen der Expert:innen aufweisen.

Mit Blick auf die von den Praktikumsleiter:innen im Rahmen einer Fragebogenstudie festgelegten acht Kernziele für Laborpraktika (Kap. 2.3.1) ist schon geschlussfolgert worden, dass diese vor allem tradierte und nicht didaktisch fundierte Zielsetzungen, die auf einen systematischen Fähigkeitserwerb fokussieren, darstellen. Ein Vergleich des Kompetenzstrukturmodells, das auf Basis charakteristischer Merkmale universitären Experimentierens entwickelt wurde, mit den Kernzielen der Laborpraktika zeigt eine deutliche Diskrepanz auf. Diese Diskrepanz ist jedoch, wie schon im Kapitel 2.3.1 diskutiert wurde, vermutlich nur auf Ebene der Formulierung bzw. der Strukturierung zu verorten. Grundsätzlich adressiert das entwickelte Kompetenzmodell die gewünschten fachmethodischen Fähigkeiten, jedoch werden diese in dem Modell deutlich differenzierter formuliert als die von den Praktikumsleiter:innen für Laborpraktika festgelegten Zielsetzungen. Die augenscheinlich die Sorgfaltsdisziplinen adressierende Sicherstellung der Reproduzierbarkeit ist ebenso in die Modellierung eingeflossen, wie die Anwendung statistischer Methoden. Jedoch sind diese beiden Zielsetzungen nicht als eigenständige experimentelle Fähigkeiten modelliert worden.

Insgesamt kann anhand der multiperspektivischen Diskussion festgehalten werden, dass die Modellierung der Dimensionen vor dem Hintergrund fachdidaktischer Theorien und Evidenzen plausibel erscheint. Eine belastbare empirische Prüfung des performanzorientierten Kompetenzstrukturmodells müsste jedoch noch in zukünftigen Studien erfolgen.

10.4. Diskussion zur Güte und Geltung der Ergebnisse

Im Folgenden sollen die Güte der Ergebnisse und die Gegenstandsangemessenheit der Forschungsmethode unter Nutzung von Gütekriterien qualitativer Forschung (vgl. Kap. 4.2) analysiert und beurteilt werden. Ausgangspunkt sind die zentralen Erkenntnisse der bisherigen Beurteilungen der Güte und Geltung der einzelnen Bestandteile dieses Forschungsprojektes.[105] Im Folgenden werden die methodische Vorgehensweise bei der Entwicklung des Kompetenzstrukturmodells sowie dessen Fundierung vor dem Hintergrund der in Kapitel 4.2 festgelegten Gütekriterien qualitativer Forschung für dieses Projekt (*a) Intersubjektive Nachvollziehbarkeit*, *b) Indikation des Forschungsprozesses*, *c) Empirische Verankerung* und *d) Limitationen*) analysiert und beurteilt.

Ziel dieses Projektes war die Analyse universitären Experimentierens hinsichtlich ihrer charakteristischen Merkmale, um aufbauend darauf einen Vorschlag für ein performanzorientiertes Kompetenzstrukturmodell zu entwickeln. Die Auseinandersetzung mit fachdidaktischen Evidenzen und Theorien in Kap. 2 zeigt, dass bisher kaum systematische Untersuchungen wissenschaftspsychologischer Fragestellungen im Sinne einer Hochschulfachdidaktik Physik durchgeführt wurden. Das Projekt besitzt dementsprechend einen hohen explorativen Charakter. Wie in Kapitel 4.2 diskutiert, sollen eine Standardisierung des qualitativen Vorgehens sowie die Sicherstellung der Gegenstandsangemessenheit über die Nutzung kodifizierter Verfahren (dokumentarische Methode, Typenbildung), eine vollständige und transparente Dokumentation sowie über die Reflexion der "Analysebrille" der beteiligten Forschenden, in dem der Grad des Situationsbezugs zum Untersuchungsgegenstand reflektiert wird, sichergestellt werden.

Als Datengrundlage wurde die Beschreibung der Performanz unterschiedlich fähiger Proband:innen (*chronologische Fallstudien*), die mittels standardisierter Experimentieraufgaben erhoben wurde, genutzt (vgl. Kap. 7.1). Hierbei stellten sich die Laborjournale ergänzend zur Performanz als sehr wirksam dar. Sie ermöglichten an sehr vielen Stellen einen differenzierteren Einblick, der nur anhand der Performanz nicht möglich gewesen wäre. Die konstruierten Experimentieraufgaben haben sich für die Entwicklung des Modells bewährt, da zum einen genug Freiheitsgerade und andererseits eine grobe Strukturierung des experimentellen Vorgehens gegeben wurden. Die grobe Strukturierung des Experimentierprozesses wurde implementiert, damit sichergestellt werden konnte, dass die Proband:innen möglichst alle relevanten Handlungen beim Experimentieren zeigen, was vermutlich aufgrund des unterschiedlichen Expertisegrades ohne Strukturierung nicht gegeben gewesen wäre. An dieser Stelle ist offen, wie sich die Performanz der Proband:innen gestaltet hätte, wenn es die grobe Strukturierung nicht gegeben hätte. Bei einigen Proband:innen, die eher niedrige Fähigkeitsprofile aufwiesen,

[105] Für einen vollständigen Überblick vgl. Kap. 5.2, 6.5, 7.3 und 8.2.

zeigte sich, dass sie diverse Begründungen ihres Vorgehens erst am Ende der Bearbeitung notiert haben. Die Expert:innen hingegen nutzten die vorgegebene Strukturierung im Prozess kaum. Hier ist zu vermuten, dass sich die Performanz der weniger fähigen Proband:innen anders gestaltet hätte. Eine tiefer gehende Analyse könnte weitere Hinweise liefern, um die Struktur und Entwicklung von Lernprozessen beim universitären Experimentieren besser zu verstehen.

Für die Analyse der *chronologischen Fallstudien*, die mittels Stimulated Recall Interviews kommunikativ validiert wurden, stellte sich die Wahl der qualitativen Auswertungsmethode *dokumentarische Methode* als praktikabel dar. Es konnte nicht an allen Stellen rein induktiv gearbeitet werden, da zum Einen die Erfahrung und Perspektive der Forschenden, die fachspezifisch und sowohl theorie- als auch erfahrungsgesteuert sind, an mehreren Stellen Einfluss darauf nahmen, welche Aspekte als bedeutsam wahrgenommen werden[106]. Zum Anderen ist für die Sicherstellung einer hohen Gegenstandsangemessenheit an einigen neuralgischen Punkten von einem rein induktiven Vorgehen abgewichen worden[107]. Dies ist z. B. beim Schritt der *formulierenden Interpretation*, bei dem die getätigten Handlungen der Proband:innen nach ihrem objektiven Sinngehalt systematisiert worden sind, der Fall gewesen. Die Zuweisung des objektiven Sinngehaltes von Handlungen beim Experimentieren auf universitärem Niveau konnte aufgrund der Komplexität und der hohen Domänenspezifität nicht rein induktiv ohne theoretische Vorannahmen bzw. ohne gängige theoretische bzw. evidenzbasierte Befunde erfolgen. Dies wird hier allerdings nicht als Einschränkung wahrgenommen, da in einem ersten Schritt rein induktiv gearbeitet und erst bei der Systematisierung und Benennung der Fachspezifität Rechnung getragen wurde, um die objektiven Sinngehalte möglichst präzise und prägnant voneinander abgrenzen und dadurch ausschärfen zu können.

Der Schritt der *reflektierenden Interpretation* sollte durch die Nutzung möglichst kontrastiver Fälle einen Zugang zu den den Handlungen zugrunde liegenden Dispositionen ermöglichen (vgl. Kap. 8.1). Die Experten-Novizen-Vergleiche stellten sich als sehr praktikabel dar. Es konnten grundsätzliche Strategien und Orientierungen der Proband:innen abhängig vom Ausbildungsstand identifiziert werden. Weiterhin ist es möglich gewesen, unterschiedliche Typiken zu identifizieren, die die Handlungen von Proband:innen hinsichtlich der charakterisierenden Merkmale bündeln. Hier ist deutlich geworden, dass je nachdem, wie viel Erfahrung sie besitzen, experimentelle Aufgabenstellungen mittels unterschiedlicher Wissensressourcen zu bewältigten, die Typiken elaborierter vorlagen. Für die Systematisierung dieses bisher noch unerschlossenen Feldes stellte die *dokumentarische*

[106] An diesen Stellen sind weiterführende Erläuterungen für die Begründung der Schritte angeführt worden, um transparent zu machen, welche Aspekte als Entscheidungsgrundlage genutzt wurden.

[107] Auch an diesen Stellen ist transparent gemacht worden, welche Entscheidung warum getroffen wurde.

Methode den besten Zugang dar. Ihr exploratives Vorgehen ermöglichte, erste Hinweise als Grundlage für weitere Studien zu gewinnen. Einschränkend muss hier angemerkt werden, dass die identifizierten charakteristischen Merkmale und auch die Modellierung der experimentellen Kompetenz auf universitären Niveau, bedingt durch den qualitativen Ansatz, nur auf Grundlage einer überschaubaren Stichprobengröße erfolgt sind. Um diese Einschränkung möglichst zu minimieren, sind mehrere Schritte unternommen worden, um die Ergebnisse zu fundieren und Hinweise zur möglichen Generalisierbarkeit zu identifizieren. So ist das entwickelte Kompetenzstrukturmodell mit einem Fachwissenschaftler hinsichtlich der Passung des Modells zur Erkenntnismethode im forschenden Bereich mittels Interrating überprüft worden. Weiterhin konnte mittels eines Expertenratings, durchgeführt mit deutschen Praktikumsleiter:innen und Betreuer:innen der Universität Paderborn, gezeigt werden, dass die Stufung der Dimension *Qualitätsausprägung*, die eine Qualitätszuweisung zur experimentellen Performanz ermöglicht, plausibel ist. Die Rückbindung der Erkenntnisse und der Modellierung in fachdidaktische Befunde im Bereich der Expertiseentwicklung und des Experimentierens zeigte, dass Hinweise in anderen Domänen bzw. in Bereichen mit anderen Bildungsansprüchen, wie der Schule, gefunden werden können, die die Aussagekraft sowohl der identifizierten Merkmale universitären Experimentierens als auch der Modellierung experimenteller Kompetenz auf universitärem Niveau stärken. Das Gütekriterium der *c) empirischen Verankerung* kann somit als erfüllt angesehen werden.

Mit Blick auf den gesamten Forschungsprozess mit all seinen Bestandteilen sollen abschließend die *d) Limitationen* und damit eng verbunden die Potenziale der Arbeit mit Blick auf zukünftige Forschungsarbeiten diskutiert werden. Insgesamt konnte durch die Beschreibung charakterisierender Merkmale universitären Experimentierens sowie mit der Entwicklung eines performanzorientierten Kompetenzstrukturmodells auf universitärem Niveau ein Beitrag zur grundsätzlichen Erforschung universitärer Lernprozesse geleistet werden. Die Erkenntnisse dieser Arbeit sind multiperspektivisch sowohl auf Ebene der Fachdidaktik als auch der Ebene der Fachwissenschaft fundiert worden. Das entwickelte Modell ermöglicht die Einschätzung der Qualität der Performanz beim universitären Experimentieren in einem bestimmten Themenbereich, nämlich der Elektrodynamik.

Hier muss einschränkend gesagt werden, dass die den Analysen zugrunde liegenden Daten nur an der Universität Paderborn erhoben wurden und dementsprechend die Ergebnisse zunächst erst einmal nur repräsentativ für diesen Standort sind. Bei der Zusammenstellung der Stichprobe ist jedoch darauf geachtet worden, dass zwei unterschiedliche Praktikumskonzeptionierungen von den Proband:innen absolviert wurden und Expert:innen ausgewählt wurden, die Erfahrungen in experimentellen Arbeitsgruppen aufweisen. Dementsprechend kann hier vermutet werden, dass eine Untersuchung des experimentellen Könnens an anderen Standorten, die vorrangig traditionelle Praktikumskonzeptionierungen

anbieten, zu ähnlichen Ergebnissen hinsichtlich der charakteristischen Merkmale führen würde. Es konnte weiterhin gezeigt werden, dass bei der Anwendung des Modells auf die Gesamtstichprobe keine Decken- oder Bodeneffekte identifiziert werden konnten, sodass hier von einer angemessenen Auflösung und somit Differenziertheit des Kompetenzstrukturmodells ausgegangen werden kann.

Hinsichtlich der Frage nach der Übertragbarkeit des Modells auf andere Inhaltsbereiche, sowohl innerhalb der Elektrodynamik als auch auf andere Gebiete der Physik kann aufgrund der Erhebung anhand zweier unterschiedlicher Aufgabenstellungen, die unterschiedliche Phänomene adressieren und durch die Nutzung unterschiedlicher Experimentiermaterialien untersucht werden sollten, vermutet werden, dass ein Transfer des Modells auch in andere Themengebiete der Physik möglich ist. Diese Vermutung ist zum Einen damit zu begründen, dass aufgrund der wissenschaftsphilosophischen Fundierung, aufgrund des Interratings mit dem Fachwissenschaftler sowie aufgrund der Zielsetzungen, die mit dem universitären Experimentieren verbunden sind, die systematisierten experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten sowie die qualitativen Ausprägungen themengebietsunabhängig für das universitäre Experimentieren Gültigkeit besitzen. Zum Anderen existieren in der schulischen Kompetenzforschung Arbeiten dazu, experimentelle Kompetenzen als fachmethodische Fähigkeiten und Fertigkeiten zu modellieren, die Hinweise zur Gültigkeit der Modellierung in mehreren Inhaltsbereichen liefern konnten (vgl. z. B. Schecker, K. Neumann u. a. 2016). Ob diese Übertragbarkeit auch für den universitären Bereich möglich ist, muss zukünftig geprüft werden.

Das Kompetenzstrukturmodell wurde auf Basis einer Datenlage entwickelt, die im Sinne der dritten Stufe nach G. E. Miller 1990 konstruiert wurde (vgl. Kap. 2.5.3). In dieser Stufe geht es um Assessment-Formate, die unter Laborbedingungen stattfinden, d. h. es werden die Rahmenbedingungen kontrolliert. An dieser Stelle ist noch offen, ob sich das entwickelte Kompetenzstrukturmodell auch für Erhebungssituationen der Stufe 4 *does*, also für die direkte Beobachtung im Rahmen von Anfängerpraktika, eignet. Hier müsste vor allem überprüft werden, ob es situative Rahmenbedingungen gibt, die einen steuernden Einfluss auf die Struktur oder die qualitative Ausprägung der experimentellen Kompetenz auf universitärem Niveau besitzen.

Schlussendlich ist noch der Aspekt der Zuschreibung einer Qualität zur Performanz zu diskutieren. In diesem Projekt wurde gezielt nur davon gesprochen, dass ein Kompetenzstrukturmodell und kein Kompetenzniveaumodell entwickelt wird, obwohl das Modell die Dimension *Qualitätsausprägung* enthält. Kompetenz*niveau*modelle dienen als Grundlage für die Messung der individuellen Ausprägungen einer Kompetenz von Lernenden. Die qualitative Graduierung wird entweder über Analysen der Aufgabenschwierigkeiten der standardisierten Testverfahren oder auf Basis von Lernendenleistungen statistisch festgelegt (siehe

Kap. 2.5.2.1). Diese Anforderungen konnten mit dem hier entwickelten Modell jedoch nicht erfüllt werden, da es sich bei den Ausprägungsstufen lediglich um mit der Community der Physik geteilte und nicht um empirisch fundierte Niveaustufen handelt. Deswegen ist in der gesamten Arbeit systematisch auf die Begrifflichkeit *Niveaustufen* verzichtet worden. Zur Weiterentwicklung des Kompetenzstrukturmodells hin zu einem Niveaumodell müssten zunächst standardisierte Messinstrumente entwickelt werden, die entweder eine *a priori Modellierung* (z. B. über die Aufgabenschwierigkeit) oder eine *post hoc Modellierung*, z. B. über eine Rasch-Skalierung, ermöglichen. Die Dimension *Qualitätsausprägung* konnte in diesem Projekt allerdings sowohl fachdidaktisch als auch fachwissenschaftlich fundiert werden und ist dementsprechend bis zu einem gewissen Grad als valide einzuschätzen. Die Qualitätsstufen sind jedoch keine Niveaustufen.

Die Ergebnisse können jedoch künftig als Ausgangspunkt für die Festlegung differenzierter Lernziele für Laborpraktika, die Entwicklung standardisierter Messinstrumente für die Messung experimenteller Kompetenz sowie für die Gestaltung der Lehr-Lernumgebung Laborpraktikum genutzt werden.

11. Zusammenfassung und Implikationen

Im Rahmen dieser Arbeit ist ein Vorschlag für ein performanzorientiertes Kompetenzstrukturmodell für die experimentelle Kompetenz auf universitärem Niveau entwickelt worden. Dieses Modell wurde anhand der Gütekriterien qualitativer Forschung auf seine Plausibilität und Passung zur Perspektive der Fachwissenschaft Physik und zu der Perspektive der Dozent:innen in Laborpraktika auf das Experimentieren überprüft.

Im Folgenden werden zunächst in Kap. 11.1 die zentralen Erkenntnisse dieser Arbeit so zusammengefasst, dass sie auch unabhängig vom Vorangegangenen lesbar sind. Basierend auf den zentralen Erkenntnissen dieser Arbeit werden im Kapitel 11.2 weiterführende Überlegungen zur tiefer gehenden Fundierung und Validierung sowie zur Anwendbarkeit des Modells für die systematische Gestaltung von Laborpraktika vorgestellt und diskutiert.

11.1. Zusammenfassung

Ausgangspunkt dieser Arbeit war die Feststellung, dass die Lehrveranstaltung Laborpraktikum einen zentralen Stellenwert in den Curricula von Physikstudiengängen einnehmen, jedoch aufgrund tradierter Zielsetzungen und Gestaltungsprinzipien aus den 1930er Jahren in der Kritik stehen, wenig lernwirksam zu sein (vgl. Kap. 2.2.3 und 2.3.3). Diverse fachdidaktische Studien im nationalen und internationalen Raum zeigen, dass das Veranstaltungsformat aufgrund der traditionell tradierten experimentellen Aufgabenstellungen, die zum Nachvollzug und nicht zum selbstständigen Experimentieren animieren, nicht mehr den heutigen Bildungsansprüchen universitärer Ausbildung genügen und deutlich hinter einer optimalen Lernwirksamkeit zurückbleiben. Als Reaktion darauf sind diverse Diskussionen zu den Zielsetzungen des Veranstaltungsformates geführt worden und einzelne neue didaktische Ansätze vor allem unter Nutzung der Potentiale der digitalen Medien umgesetzt worden. Resultat dieser Bemühungen ist, dass es einen Konsens darüber gibt, dass Student:innen im Rahmen von Laborpraktika die Erkenntnismethode des Experimentierens erlernen sollen. Jedoch ist aufgrund fehlender fachdidaktischer Forschungsarbeiten noch nicht klar, wie dieser Erwerb systematisch erfolgen soll und wie danach die Lernwirksamkeit gemessen werden kann.

Wissenschaftspsychologische Arbeiten, die sich mit den Zielsetzungen des Veranstaltungsformates oder der Systematisierung der experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten, z. B. in Form von Kompetenzmodellen, beschäftigen, um eine didaktische Fundierung und Steigerung der Lernwirksamkeit zu erreichen, sind

bisher auf universitärem Niveau nicht durchgeführt worden. Es stellt sich hier insbesondere die Frage, wie ein noch nicht grundsätzlich beforschtes Feld zugänglich gemacht werden kann, um charakteristische Merkmale des universitären Experimentierens identifizieren und systematisieren zu können. In dieser Arbeit wurde sich dem aktuellen Status Quo der experimentellen Ausbildung und didaktischen Fundierung aus mehreren Richtungen genähert.

Die Analyse wissenschaftsphilosophischer Arbeiten zur Genese von Erkenntnissen in der Physik sowie Ergebnisse aus der Expertiseforschung zum physikalischen Problemlösen lieferten Hinweise zur grundsätzlichen Natur des universitären Experimentierens sowie zu dem im Studium zu erreichenden Niveau an experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten (vgl. Kap. 2.1). Experimentieren auf universitärem Niveau stellt demnach einen hochkomplexen und dynamischen Prozess dar, in dem sich Forschende durch die Herstellung einer Kohärenz zwischen dem physikalischen Phänomen, den experimentellen Handlungen sowie den technischen Geräten um eine möglichst hohe Signalstabilität bemühen. Sie gehen dabei nicht rein deduktiv oder induktiv vor. Vielmehr ist zu vermuten, dass sie während des Herstellens der Kohärenz abduktives Schließen praktizieren. Das bedeutet, dass, ähnlich wie Ärzte beim Erstellen von Diagnosen, abhängig vom individuellen Wissen und den Rahmenbedingungen wahrscheinliche Hypothesen aufgestellt werden, welche nächsten Schritte eine Erhöhung der Signalstabilität bewirken können. Diese werden hinsichtlich ihres Erfolges überprüft und je nach Ausgang der Überprüfung entweder tiefer gehend hinsichtlich ihrer Gültigkeit überprüft oder verworfen, um dann die nächstwahrscheinlichen experimentellen Schritte zu durchlaufen. Die Expertiseforschung zeigt, dass Expert:innen, besonders bei der Suche nach einem Lösungsansatz, aufgrund ihres dynamisch vernetzten Wissensnetzwerkes sehr differenziert, schnell und erfolgreich arbeiten. Noviz:innen hingegen durchdenken Lösungen weniger und können aufgrund fehlender elaborierter Lösungsstrategien weniger erfolgreich arbeiten.

Nach Klärung des grundsätzlichen Wesens des Experimentierens auf universitärem Niveau ist in einem zweiten Schritt das Experimentieren an Schulen analysiert worden, um Hinweise zu erhalten, mit welchen experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten Schüler:innen ihr Physikstudium an der Universität beginnen (vgl. Kap. 2.2). Anhand der Analyse ist deutlich geworden, dass die experimentelle Ausbildung an Schulen durch normative Setzungen (Bildungsstandards, Kernlehrpläne) didaktisch stark strukturiert und systematisiert ist. Weiterhin bleibt die experimentelle Ausbildung an Schulen aufgrund ungünstiger Lernumgebungen sowie nicht immer geeignet ausgebildeter Lehrer:innen ebenfalls deutlich hinter ihrer möglichen Lernwirksamkeit zurück. Im Besonderen ist bei der Analyse deutlich geworden, dass Schule ihrem Bildungsanspruch nach keine Forscher:innen ausbildet, d. h. elaborierte Handlungsressourcen ausbilden will, sondern die Schüler:innen zu einer kritischen Auseinandersetzung und Bewertung experimenteller Daten und Forschungsergebnisse befähigen möchte, um eine umfassende Aus-

bildung im Sinne des Konstruktes *scientific literacy* zu gewährleisten. Es steht demnach nicht die Befähigung zum Experimentieren, sondern eher die kritische Auseinandersetzung nach Ansatz des *Nature of Science* im Vordergrund.

Nach Analyse ihres Anfangs- und Endzustandes wurde anschließend die universitäre Lehr-Lernumgebung Laborpraktika hinsichtlich ihrer Lernwirksamkeit und ihrer typischen Gestaltungsprinzipien analysiert (vgl. Kap. 2.3). Fazit ist, dass für die experimentelle universitäre Ausbildung auf normativer Ebene nur grobe Zielsetzungen von der Konferenz der Fachbereiche Physik festgelegt wurden, d. h. die konkrete Ausgestaltung der Lehr-Lernumgebung obliegt u. a. auch aufgrund der Lehrfreiheit den Laborpraktikumsleiter:innen. Die Zielsetzungen, die die deutschen Praktikumsleiter:innen, die meist Fachwissenschaftler:innen sind, festgelegt haben, sind wenig differenziert und nicht systematisch fundiert formuliert. Sie sind dementsprechend wenig funktional für die Gestaltung einer Lernumgebung, die den systematischen Erwerb experimenteller Fähigkeiten und Fertigkeiten ermöglichen könnte. Weiterhin ist durch den Kontrast zur schulischen Ausbildung deutlich geworden, dass es in den Zielsetzungen an einer Reflexionsebene für den Erwerb experimenteller Fähigkeiten fehlt. Anders als in der Schule, wo das Konstrukt *Nature of Science* zur Reflexion der experimentellen Methode bzw. experimenteller Ergebnisse genutzt wird, müsste für eine elaborierte Auseinandersetzung mit der Erkenntnismethode Experimentieren auf universitärem Niveau ein für experimentelle Handlungen funktionales Wissenschaftsverständnis erworben werden.

Die vergleichende Analyse des Experimentierens in der Forschung, im Studium und in der Schule ermöglichte das Ableiten von Charakteristika des Experimentierens, die für die Modellierung experimenteller Kompetenz auf struktureller Ebene genutzt werden können: Mögliche kognitive Prozesse beim Experimentieren (z. B. unterschiedliche Formen des Schließens), Hinweise zu komplexitätsbestimmenden Merkmalen des Experimentierprozesses (z. B. iterativer Prozess zwischen physikalischem Wissen, experimentellen Handlungen und den Geräten), didaktische Merkmale der typischen Gestaltung von Laborpraktika sowie Hinweise zur Lernwirksamkeit (z. B. inhaltliche Orientierung, Art experimenteller Aufgabenstellungen).

Im nächsten Schritt wurden die Vorgehensweisen bei der Kompetenzmodellierung sowie Konstrukte der experimentellen Kompetenz auf schulischem Niveau analysiert (vgl. Kap. 2.5). Ziel war, zu analysieren, ob ggf. bestehende Konstrukte adaptiert werden können sowie zu analysieren, welche grundsätzlichen Schritte für die Systematisierung der experimentellen Kompetenz auf universitärem Niveau identifiziert werden können. Ersteres ist aufgrund der unterschiedlichen Bildungsansprüche von Schule und Universität nicht möglich. Hier ist insbesondere erschwerend, dass unklar ist, in welcher Weise die Kompetenzmodelle oder Messinstrumente angepasst werden müssten, da die zentralen charakteristischen

Merkmale universitären Experimentierens nicht ausreichend präzisiert sind. Mit Bezug auf das Veranstaltungsformat Laborpraktikum kann festgestellt werden, dass es kein einheitliches Curriculum, keine differenzierten Zielsetzungen und keine Strukturierungen der experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten gibt. Die Analyse der typischen methodischen Herangehensweise bei der Modellierung von Kompetenzen ermöglichte diverse a posteri Festlegungen für die Modellierung (z. B. ein deskriptives performanzorientiertes Kompetenzstrukturmodell mit drei Dimensionen) und sie lieferte Hinweise zu möglichen theoretischen Rahmungen der zu entwickelnden Dimensionen *Inhaltsbereiche*, *Fachmethodik* und *Qualitätsausprägung* des Strukturmodells.

Für die Entwicklung des performanzorientierten Kompetenzstrukturmodells für Physikstudierende ist ein mehrstufiges Untersuchungsdesign festgelegt worden (vgl. Kap. 4). Als erstes ist die Dimension *Inhaltsbereiche* durch eine qualitative Inhaltsanalyse von Experimentieranleitungen von zehn deutschen Universitäten entwickelt worden. Basierend auf der inhaltlichen Systematisierung sind zwei unterschiedlich komplexe Experimentieraufgaben für den Inhaltsbereich *Elektrodynamik* nach dem Ansatz *open-ended-investigation* entwickelt worden. Die zwei Experimentieraufgaben sind im Rahmen der Studie von 16 aufgrund ihres Ausbildungsfortschritts als unterschiedlich fähig angenommenen Proband:innen bearbeitet worden. Sie sind dabei gefilmt worden, haben ein Laborjournal geführt und eine digitale Auswertungsdatei angelegt. Auf Basis dieser Datengrundlage sind für jede Probandin/jeden Probanden *chronologische Fallbeschreibungen* zusammengestellt worden. Diese sind mittels *Stimulated-Recall Interviews* hinsichtlich ihrer Korrektheit überprüft worden.

Die Entwicklung der beiden Dimensionen *Fachmethodik* und *Qualitätsausprägung* wird unter Nutzung eines qualitativen Verfahrens, nämlich der *dokumentarischen Methode*, realisiert (vgl. Kap. 8). Dazu sind die *chronologischen Fallbeschreibungen* beim ersten Analyseschritt der *formulierenden Interpretation* zunächst auf Oberflächenebene, genauer der Performanzebene, hinsichtlich der strukturierenden Elemente analysiert worden (vgl. Kap. 9.2). Durch kontrastive Fallvergleiche konnten sieben Facetten, die die Systematisierung der Dimension *Fachmethodik* darstellen, inklusive mehrerer Subfacetten abgeleitet werden. Anschließend wurde auf Tiefenebene analysiert, welche handlungsgenerierenden und -steuernden Dispositionen die Proband:innen beim Experimentieren aufweisen (vgl. Kap. 9.3). Hier konnte festgestellt werden, dass die Proband:innen abhängig vom Ausbildungsstand unterschiedliche Spezifika, d. h. Subtypen innerhalb der Typiken *Zielorientierung* und *Vernetzungsgrad* zwischen den strukturierenden Elementen aufweisen. Weiterhin ist deutlich geworden, dass zwischen den Subtypen der beiden Typiken unterschiedliche Kombinationsmuster auftreten, sodass eine relationale Typenbildung durchgeführt werden konnte. Die relationale Typenbildung ermöglichte es, die Facetten der Dimension *Qualitätsausprägung* zu entwickeln. Mittels der Stufen dieser Dimension ist eine Zuschreibung einer qualitativen

Ausprägung zu einer experimentellen Handlung möglich.

Das so entwickelte performanzorientierte Kompetenzstrukturmodell (vgl. Kap. 9.4) ist anschließend mit den Perspektiven unterschiedlicher Akteur:innen abgeglichen worden. Erstens wurde die Passung zur Perspektive der Fachwissenschaft Physik überprüft, indem im Sinne eines Interratings ein Fachwissenschaftler mittels des Modells sechs *chronologische Fallbeschreibungen* eingeschätzt hat (vgl. Kap. 10.1). Die Prüfung der Übereinstimmungsquote zeigt, dass die Einschätzungen durch das Modell sowie durch den Fachwissenschaftler sehr gut übereinstimmen, sodass hier eine hohe Passung zum Experimentieren in der Forschung plausibel erscheint.

Zweitens ist die Passung des Modells zur Perspektive der deutschen Praktikumsleiter:innen und Betreuer:innen durch ein Expertenrating untersucht worden (vgl. Kap. 10.2). Die Expert:innen erhielten unterschiedliche Handlungsbeschreibungen, die sie hinsichtlich der Qualität mit Schulnoten, einem gängigen Bewertungsmaßstab, einschätzen sollten. Die Ergebnisse dieser Einschätzung der Expert:innen sind mit den durch das Modell erfolgten Einschätzungen verglichen worden. Die Ergebnisse des Expertenratings zeigen, dass die durch das Modell zugewiesenen qualitativen Einschätzungen der experimentellen Handlungen eine sehr hohe Passung zu den Einschätzungen der Expert:innen aufweisen.

Zuletzt sind die identifizierten charakteristischen Merkmale des Experimentierens, d. h. die für Handlungen funktionalen Wissensressourcen und das Wissenschaftsverständnis, vor dem Hintergrund fachdidaktischer Evidenzen diskutiert worden (vgl. Kap. 10.3). Es zeigt sich eine hohe Passung der identifizierten Merkmale mit Evidenzen aus der Expertiseforschung sowie zur Lehr-Lernforschung.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte folglich ein Vorschlag für ein performanzorientiertes Kompetenzstrukturmodell für Physikstudierende vorgelegt werden, das vor dem Hintergrund der Perspektiven der Fachwissenschaft, der Praktikumsleiter:innen und Betreuer:innen sowie fachdidaktischer Evidenzen eine begründete Plausibilität aufweist. Das Modell systematisiert die typischen Inhaltsbereiche von Anfängerlaborpraktia, die fachmethodischen Fähigkeiten und Fertigkeiten sowie qualitativ unterschiedliche Ausprägungsgrade dieser Fähigkeiten. Damit ist ein erster Beitrag zur wissenschaftspsychologischen Fundierung des Erwerbes experimenteller Kompetenzen auf universitärem Niveau geleistet worden.

11.2. Implikationen

Kompetenzstrukturmodelle stellen im schulischen Bereich die Grundlage für die Gestaltung von Lernwegen sowie die Überprüfung des Erfolgs des Unterrichts

durch die Messung der Fähigkeiten und Fertigkeiten der Schüler:innen dar. Sie sind, verglichen mit der universitären Ausbildung, durch zentrale politische Vorgaben in Form von Bildungsstandards und Lehrplänen normativ besser fundiert und auch fachdidaktisch weitreichend beforscht. So beinhalten sie typischerweise die normativen Setzungen der zu erreichenden Learning Outcomes.

In dem hier entwickelten Modell konnten aufgrund der Lehrfreiheit im Bereich der universitären Lehre und damit verbunden den eher groben Richtlinien, die den Rahmen der Lehre vorgeben, keine differenzierten Zielsetzungen zugrunde gelegt werden. Weiterhin ist auch nicht klar, welches Niveau Student:innen im Rahmen ihrer experimentellen Ausbildung am Ende der ersten Laborpraktika erreicht haben sollten. Aufgrund dieser fehlenden normativen Vorgaben sowie dem Fehlen einer grundlegenden hochschulfachdidaktischen oder wissenschaftspsychologischen Fundierung universitärer Lehre im Fach Physik werden zur Formulierung von Implikationen nachfolgend Ansätze der schulischen Kompetenzforschung sowie der Forschung zu systematischen Lernprozessen für den universitären Bereich adaptiert.

Im ersten Schritt werden Überlegungen angestellt, wie zukünftig das performanzorientierte Kompetenzstrukturmodell tiefer gehend validiert und weiterentwickelt werden kann (Kap. 11.2.1). Im Kapitel 11.2.2 werden auf Basis der Erkenntnisse der Arbeit Hinweise abgeleitet, wie schon jetzt mittels des Modells die Lernumgebung Laborpraktikum weiterentwickelt werden kann.[108]

11.2.1. Implikationen für die Messung experimenteller Kompetenz auf universitärem Niveau

Basierend auf den Erkenntnissen dieses Projektes können nachfolgend Implikationen abgeleitet werden, die zukünftig zum einen die weitere Validierung des Kompetenzstrukturmodells und zum anderen die Entwicklung eines Instrumentes zur Messung der experimentellen Kompetenz auf universitärem Niveau betreffen.

Die Entwicklung des Kompetenzstrukturmodells basiert auf zwei unterschiedlich komplexen experimentellen Aufgabenstellungen aus dem physikalischen Inhaltsbereich der Elektrodynamik, die von insgesamt 16 Proband:innen unterschiedlichen Expertisegrades bearbeitet wurden. Die Datengrundlage basierte vor allem auf der videografierten Performanz und den handschriftlichen Laborjournalen. Das deskriptive Kompetenzmodell ist aufgrund fehlender normativer und empirischer Befunde mittels eines qualitativen Analyseansatzes entwickelt

[108] Es werden nicht noch einmal alle in den einzelnen Kapiteln herausgearbeiteten Desiderata aufgegriffen. Die Implikationen werden hier auf einem weniger detaillierten Niveau diskutiert.

und hinsichtlich der Passung zur Perspektive der Fachwissenschaft sowie der Praktikumsleiter:innen und Betreuer:innen auf das universitäre Experimentieren abgeglichen worden.

Da das Kompetenzstrukturmodell auf Basis von experimentellen Aufgabenstellungen aus dem Inhaltsbereich Elektrodynamik basiert, können keine Aussagen dazu getätigt werden, inwiefern das Modell auch Gültigkeit für andere Inhaltsbereiche der Physik besitzt. Es konnten jedoch Hinweise identifiziert werden, die erste Aussagen zu einer Generalisierbarkeit des Modells liefern können. Die vergleichende Analyse der Bearbeitungen der beiden Aufgabenstellungen zeigte, dass es aufgrund des jeweiligen physikalischen Inhalts zu keinen Unterschieden bei den experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten gekommen ist. Ähnliches konnte auch bei dem Stufenmodell zur experimentellen Kompetenz im schulischen Bereich (Schecker, K. Neumann u. a. 2016) gezeigt werden. Hier wurde das Stufenmodell, das auf Basis von Experimentieraufgaben aus den Bereichen Optik und Elektrodynamik entwickelt wurde, an einem anderen physikalischen Inhaltsbereich (Mechanik) erprobt. Die Schwellenwerte, um in eine nächsthöhere Stufe zu gelangen, änderten sich um eine Standardabweichung, sodass die Stufen beibehalten werden konnten. Hier wäre zu vermuten, dass das hier entwickelte Kompetenzstrukturmodell auch in den anderen Inhaltsbereichen von Anfängerlaborpraktika, wie u. a. Mechanik, Optik, Atomphysik, praktikabel ist. Dies müsste allerdings noch geprüft werden.

Die Fundierung des entwickelten Kompetenzstrukturmodells ist u. a. durch ein Expertenrating mit den deutschen Praktikumsleiter:innen und Paderborner Betreuer:innen realisiert worden (vgl. Kap. 10.2). Die Expert:innen haben dazu Auszüge aus den Handlungsbeschreibungen des Experimentierens der unterschiedlich fähigen Proband:innen mit Schulnoten hinsichtlich der Qualitätsausprägung eingeschätzt. Es wurde folglich aus zeit- und testökonomischen Gründen auf einen Abgleich der Qualitätseinschätzungen auf Basis der videografierten Handlungen verzichtet. Hier müsste überprüft werden, ob es durch die Nutzung der Videodaten zu anderen Qualitätseinschätzungen seitens der Expert:innen kommt.

Basierend auf dem Kompetenzstrukturmodell könnte ein Testinstrument entwickelt werden, das eine tiefer gehende Prüfung des Modells ermöglichen würde. Wie in Kapitel 2.5.3 diskutiert, eignen sich für die performanzorientierte Messung von Fähigkeiten und Fertigkeiten vor allem Assessmentformate, die die Stufen 3 (shows how) und 4 (does) nach Miller (1990) adressieren. Eine mögliche Realisierung wäre hier die Übersetzung des Modells in einen Beobachtungsbogen. Dies würde eine testökonomischere Erhebung der Performanz auch mit größeren Stichproben ermöglichen. Dieses Instrument könnte sowohl im Rahmen von Laboruntersuchungen (shows how) mit kontrollierten Rahmenbedingungen als auch während realer Praktikumsversuche (does) eingesetzt werden. Ein solcher Beobachtungsbogen müsste umfangreich validiert werden, um sicherzugehen,

dass er eine möglichst präzise Einschätzung experimenteller Fähigkeiten und Fertigkeiten auf universitärem Niveau zulässt. Hier wäre auch zu prüfen, ob eine Erhebung der Performanz ergänzt durch ein (u. U. teilweise vorstrukturiertes) Laborjournal die Qualität der Erhebung erhöhen würde. Weiterhin müsste, wenn der Beobachtungsbogen von Fachwissenschaftler:innen, die typischerweise die Lehre im Rahmen von Anfängerlaborpraktika umsetzen, eingesetzt werden soll, eine Kurzschulung zur Nutzung des Bogens entwickelt werden. Hierfür würden sich die im Rahmen dieses Projektes erhobenen Daten eignen, um anhand neuralgischer Punkte die Einschätzung der Qualitätsausprägung experimenteller Fähigkeiten und Fertigkeiten zu illustrieren.

Der Einsatz eines validen Beobachtungsbogens für die experimentelle Performanz könnte einen Beitrag zur Klärung folgender Fragen leisten:

1. Welche Qualitätsausprägungsstufe experimenteller Performanz soll im Rahmen von Anfängerlaborpraktika zu welchem Zeitpunkt erreicht werden? In diesem Zusammenhang konnte in diesem Projekt gezeigt werden, dass durchaus auch schon Student:innen am Ende ihres dritten Semesters die höchsten Qualitätsausprägungsstufen erreichen. Eine Klärung dieser Frage würde es ermöglichen, differenziertere Zielsetzungen für Laborpraktika festzulegen. Hier wäre auch denkbar, die Laborpraktika, die nach Abschluss des Anfängerpraktikums im Laufe des Studiums absolviert werden sollen, mit einzubeziehen. Dies würde eine systematische Festlegung der Lernziele abhängig vom Studienfortschritt ermöglichen.

2. Welchen Einfluss besitzen unterschiedliche Praktikumskonzeptionierungen auf die Lernleistung? Hier konnten schon erste Hinweise gefunden werden, dass Student:innen, die ein Anfängerlaborpraktikum mit fachmethodischem Fokus und einem erhöhten Anteil an experimentellen Aufgabenstellungen, die eher dem context of discovery zuzuordnen sind, absolviert haben, höhere Qualitätsausprägungsstufen erreichen.

3. Wie entwickeln sich die experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten auf universitärem Niveau? Dazu müssten individuelle Lernpfade beim universitären Experimentieren im Sinne von *learning progressions* (Alonzo und Steedle 2009) im Rahmen von Längsschnittstudien untersucht werden. Hier wäre auch ein zusätzlicher Einsatz eines fachmethodischen Wissenstests interessant, um einen Abgleich der Wissensressourcen und deren Funktionalität für die Performanz leisten zu können. Weiterhin könnten so Hinweise zu den Stellen in Lernprozessen identifiziert werden, an denen zunächst träges Wissen funktional wird oder eine Entwicklung von der Anwendung von Heuristiken hin zur Nutzung von funktionalen experimentellen Strategien geschieht. Es könnten also Schwellen identifiziert werden, an denen praktische Erfahrung qualitativ hochwertiger nützlich wird. Erfahrung kann nicht

direkt vermittelt werden, vielmehr müssen die Student:innen eine Vielzahl unterschiedlicher Problemklassen und deren Lösungsschritte durchlaufen, um elaborierte experimentelle Fähigkeiten auszubilden. Hier scheinen die engmaschigen Anleitungen aus dem schulischen und universitären Bereich zu sehr stabilen Heuristiken, die ohne fachliche Wissensressourcen funktional sind, zu führen, weswegen in dieser Studie auch Student:innen am Ende des dritten Semesters immer noch undifferenziert experimentieren. Es stellt sich die Frage, wann der Punkt der Stabilisierung der Fähigkeiten erfolgt und wie dies mittels geeigneter Lehr-Lernumgebungen unterstützt werden kann. Dazu wäre wahrscheinlich auch der Einsatz eines Fragebogens, der das Wissenschaftsverständnis der Student:innen erhebt, von besonderen Interesse, da im Rahmen der Studie gezeigt werden konnte, dass die höheren Qualitätsausprägungsstufen mit einem höheren Verständnis der Prinzipien der physikalischen Forschung verknüpft zu sein scheinen.

4. Kann über die Gestaltung kurzer experimenteller Aufgabenstellungen, die lediglich einen Ausschnitt aus dem Gesamtprozess darstellen, für deren Lösung aber ein hohes Maß an experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten benötigt wird, die Messung individueller Lernstände erreicht werden? Die Analyse der Experimentierprozesse zeigte eigentlich, dass für eine präzise Einschätzung der Fähigkeiten und Fertigkeiten der vollständige Gesamtprozess analysiert werden müsste, um der hohen Iterativität gerecht zu werden. Jedoch konnten in diesem Projekt auch Stellen identifiziert werden, an denen die Proband:innen mit ihren vorliegenden experimentellen Wissensressourcen keine Routinelösung erbringen konnten. Hier kann vermutet werden, dass kurze Experimentieraufgaben, die z. B. den Umgang mit herausfordernden Stellen adressieren, ein großes Potential aufweisen, solide Hinweise auf die grundsätzlich vorliegenden experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten zu liefern (vgl. dazu auch Geller, Schneider und Theyßen 2020). Auch dies müsste jedoch mittels einer angemessen großen Stichprobe noch überprüft werden.

Grundsätzlich könnten die Klärung dieser Fragen sowie das Erheben der experimentellen Performanz Physikstudierender in unterschiedlichen Ausbildungsstadien einen Beitrag dazu leisten, zukünftig die Messung experimenteller Kompetenz anhand der gezeigten Performanz zu realisieren. Dies würde nicht nur die Gestaltung der Lernumgebung Laborpraktikum über das gesamte Studium gesehen deutlich beeinflussen, sondern auch die Entwicklung valider Leistungsüberprüfungen ermöglichen.

11.2.2. Implikationen für die Weiterentwicklung von Laborpraktika

Während im vorangegangenen Kapitel Implikationen für die zukünftige Weiterentwicklung und Nutzung des performanzorientierten Kompetenzstrukturmodells im Fokus standen, werden folgend Implikationen des Modells diskutiert, die von Praktikumsleiter:innen schon jetzt für die Weiterentwicklung der Lehr-Lernumgebung Laborpraktikum genutzt werden können.

Die kontrastive Analyse charakterisierender Aspekte unterschiedlich fähiger Proband:innen zeigte, dass vor allem der Teil der Student:innen, der ein traditionelles Laborpraktikum mit kleinschrittigen Arbeitsanweisungen absolviert hat, beim Experimentieren als Routinevorgehen fachunspezifische Heuristiken und nicht elaborierte fachspezifische Strategien nutzt. Am Fall von Piet (vgl. Kap. 9.1.2.3 und 9.3.2) ist herausgearbeitet worden, dass in dem Moment, wo die Heuristiken nicht mehr funktional für die Performanz sind, fachspezifische Strategien anwendet werden. Die kleinschrittigen Anleitungen scheinen eher einen Erwerb von Heuristiken zu begünstigen als den von experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten. Im Falle solcher Student:innen scheint es so, als hätten sie im Laufe der drei Semester experimenteller Ausbildung ihre Fähigkeiten und Fertigkeiten kaum elaborieren können. Sie erreichten meist nur die unteren drei Qualitätsausprägungsstufen des Kompetenzstrukturmodells. Die Wirksamkeit vom kleinschrittigen Experimentieranleitungen, die auch im schulischen Bereich breitflächig eingesetzt werden, ist schon seit Jahrzehnten umstritten, da diese nicht zu einer tiefer gehenden Auseinandersetzung mit den physikalischen Inhalten und Methoden anregen (vgl. Kap. 2). Mit Blick auf die Schule (vgl. Kap. 2.2.3) zeigt sich z. B. im Rahmen der TIMS-Studie, dass deutsche Oberstufenschüler:innen[109] zumeist praktisch-manuelle Schrittfolgen eingeübt haben. Sie zeigen hinsichtlich der experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten vor allem Defizite im Bereich des selbstständigen fachlichen Argumentierens (z. B. bei der Beurteilung von Messergebnissen) sowie beim vertieften begrifflichen Verständnis (Schecker, Fischer und Wiesner 2004). Die Student:innen, die das traditionelle Laborpraktikum durchlaufen haben, zeigen ähnliche Defizite, sodass geschlussfolgert werden muss, dass sie im Rahmen der universitären experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten und hier im Speziellen hinsichtlich der Differenziertheit des Vorgehens sowie der grundsätzlichen Prinzipien der Wissenschaft Physik kaum Lernzuwachs zeigen.

Hier stellt sich nun die Frage, wie die Lehr-Lernumgebung Laborpraktikum gestaltet werden sollte, um einerseits die Student:innen beim Übergang zwischen Schule und Hochschule bestmöglich beim Erwerb experimenteller Fähigkeiten

[109] Hier muss angemerkt werden, dass die experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten mittels eines schriftlichen Testinstrumentes erhoben wurden. Es können also keine Aussagen bezogen auf die Performanz, d. h. die tatsächlich für Handlungen funktionalen Wissensressourcen, getätigt werden. Dies stellt aktuell noch ein Desiderat dar.

und Fertigkeiten auf universitärem Niveau zu unterstützen und andererseits eine Realisierung auch für Massenstudiengänge inkl. aller limitierender Rahmenbedingungen (personelle, zeitliche und technische Ausstattung) zu ermöglichen. In Bezug darauf soll im Folgenden analysiert werden, inwiefern die Erkenntnisse dieser Arbeit für die Gestaltung von Laborpraktika genutzt werden können.

Die typische Gestaltungssystematik universitärer Lehre beinhaltet das systematische Anlegen von Lerngelegenheiten, was sowohl die Art der Aufgabenstellung als auch deren Formulierung umfasst. Der Fall von Piet zeigt, dass erst in fordernden Situationen experimentelle Fähigkeiten und Fertigkeiten angewendet werden. Mit fordernden Situationen sind hier meist experimentelle Situationen gemeint, in denen die Lernenden eine unbekannte Situation mittels einer neuen Kombination ihrer Wissensressourcen bewältigen sollen. Diese Situationen sind damit dem *context of discovery* zuzuordnen. Es geht also eher darum, zu explorieren als zu überprüfen. Lehr-lerntheoretisch sind diese Situationen als näher am Lernen einzuschätzen als Aufgabenstellungen, in denen etwas geprüft werden soll (u. a. Huber 2009). Hierbei ist nicht gemeint, dass die Student:innen selbst forschend tätig werden, also im Sinne von Forschung einen noch unbekannten Aspekt tiefer untersuchen. Vielmehr geht es um für die Lernenden neue Situationen, d. h. sie konstruieren sich selbstständig die Lösung für eine für sie noch unbekannte Situation, indem sie ihre bestehenden Wissensressourcen abhängig von den Rahmenbedingungen der Situation neu organisieren. Ziel ist hier, eine Erklärung für die Situation zu finden, die vorher den Lernenden nicht bekannt ist. Hier wird deutlich, dass diese Aufgabenstellungen angemessen auf das Lernenden-Niveau[110] abgestimmt werden müssen, damit sie von den Lernenden auf der Grundlage bestehender Fähigkeiten im Sinne eines Transfers bearbeitet werden können. Zu komplexe Aufgabenstellungen würden hier zu einer Überforderung und dementsprechend zu motivationalen Schwierigkeiten führen. Lösungsansätze von Aufgabenstellungen, die dem *context of justification* zuzuordnen sind, sind dagegen als strukturell orientiert zu klassifizieren, d. h. die zu absolvierenden Lösungsschritte sind bekannt und werden von den Lernenden (adaptiert) auf die Situation angewendet. Ziel ist hier meist, die Prüfung von Hypothesen oder Gesetzmäßigkeiten. Die Auseinandersetzung mit dem Experimentieren in der Forschung (vgl. Kap. 2.1) zeigte, dass Physiker:innen in ihrem Forschungsalltag sowohl Situationen des *context of discovery* als auch des *context of justification* bewältigen. Um den elaborierten Erwerb experimenteller Fähigkeiten und Fertigkeiten auf universitärem Niveau zu ermöglichen, sollten ab Beginn des ersten Semesters experimentelle Situationen bereitgestellt werden, in denen nicht nur bestehendes Wissen überprüft wird. Stattdessen sollten die Aufgabenstellungen

[110] Die Anforderungen der Aufgabenstellungen müssen dabei so bemessen sein, dass sie innerhalb der Zone der nächsten Entwicklung (zone of proximal development, Rieber 1998, Murphy 2022) liegen. Aufgabenstellungen sollten dementsprechend nicht so gestaltet sein, dass sie von den Lernenden mit ihren vorhandenen Fähigkeiten gelöst werden können. Vielmehr sollten sie so fordernd sein, dass sie die Weiterentwicklung der bestehenden Fähigkeiten adressieren.

so gewählt werden, dass die Student:innen schrittweise unterschiedliche Problemklassen sowie deren dazugehörige Lösungsschritte in verschiedenen Kontexten unter Begleitung durch die Dozent:innen erlernen können.

Dies klingt nach Zielen, die mit einer großen Studierendenschaft kaum zu erreichen sind. Jedoch soll hier angemerkt werden, dass die Elaboration der experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten einen jahrelangen Lernprozess darstellen, d. h. nicht alles muss in allen Details schon in den Anfängerpraktika geleistet werden. Vielmehr sollte der Lernprozess verteilt über die gesamte Studienzeit angelegt sein, um eine Routineexpertise basierend auf Problemschemata erwerbbar zu machen (Reinhold, Lind und Friege 1999). Im Rahmen von Anfängerpraktika in den ersten Semestern des Bachelorstudiums kann jedoch der grundlegende Erwerb experimenteller Fähigkeiten und Fertigkeiten angelegt werden. Bricht man die Erkenntnisse dieser Arbeit auf die Kernbestandteile herunter, dann bleiben folgende Kernaspekte des universitären Experimentierens übrig:

1. Ziel des Experimentierens ist nicht das Ergebnis, sondern dessen möglichst präzise Einordnung und Beurteilung. Experimentieren besitzt demnach eine sehr hohe Komplexität.

2. Es gibt kein Standardvorgehen beim universitären Experimentieren. Die Struktur wird durch die Einhaltung der wissenschaftlichen Prinzipien wie Sicherstellung der Reproduzierbarkeit über Transparenz des Gesamtprozesses beeinflusst.

3. Jede Entscheidung der Experimentator:innen, egal ob technisch, methodisch oder fachinhaltlich, beeinflusst den Experimentierprozess.

4. Experimentieren ist kein linearer Prozess, sondern aufgrund der hohen Komplexität stark iterativ.

Diese Kernaspekte umfassen die Merkmale, die universitäres Experimentieren vom schulischen unterscheidet, und stellen dementsprechend die Aspekte dar, die im Rahmen geeigneter experimenteller Aufgabenstellungen grundlegend vermittelt werden sollten. Dazu können beispielsweise die Instruktionen der bestehenden kleinschrittigen Experimentieranleitungen gezielt geöffnet und ein höherer Fokus auf (Teil-)Aufgabenstellungen mit explorativen Anteilen gelegt werden.[111] Der Fokus der Teilaufgabenstellungen pro Experiment sollte eher auf die Begründung der einzelnen experimentellen Schritte sowie auf die Analyse des Einflusses der Entscheidung auf den Gesamtprozess des Experimentes gelegt werden. Statt der Vorgabe, in welchen Schrittweiten und Intervallen Messwerte aufgenommen werden sollen, könnte stattdessen gefordert werden, dass die Student:innen dies in

[111] Ähnliches fordern z. B. auch Holmes, Wieman und Bonn 2015, Hackling und Garnett 1992, Heinicke 2012.

der Vorbereitung selbst durchdenken sollen. Hier wäre natürlich notwendig, dass die Student:innen dies mit den Dozent:innen zu Beginn des Experimentierens gemeinsam diskutieren und herleiten. Alternativ könnte statt nur eines Messwerkzeuges auch ein zweites mit unterschiedlichen Spezifikationen bereitgestellt werden, sodass sich die Student:innen im Austausch mit den Dozent:innen begründet für eines der beiden auf Grundlage der jeweiligen Spezifika entscheiden können. Um dies systematisch über die Veranstaltung (semesterweise oder über die gesamte Zeitspanne des Anfängerpraktikums) anlegen zu können, können das entwickelte Kompetenzstrukturmodell und hier insbesondere auch die *handlungsorientierten Indikatoren* (vgl. Kap. 9.3.3.2) als Entwicklungsraster genutzt werden. Dazu würden die bestehenden Anleitungen hinsichtlich der Potenziale und Grenzen bei der Fokussierung einzelner experimenteller Fähigkeiten und Fertigkeiten (vgl. Dimension *Fachmethodik*) analysiert werden. Basierend auf der Analyse könnte pro Experiment die zu fokussierende experimentelle Fähigkeit festgelegt und durch eine Veränderung der bestehenden Instruktion oder durch das Hinzufügen einer passenden Instruktion adressiert werden. Mit der Dimension *Qualitätsausprägung* kann die Komplexität der Aufgabenstellungen gesteuert werden. Im ersten Semester des Anfängerpraktikums wäre denkbar, dass man die bei der Lösung zu beachtenden Aspekte einschränkt, indem man sie vorgibt. Für das Beispiel *Messplan erstellen* könnte eine schrittweise Erhöhung der Komplexität (über mehrere Experimente entweder in einem Semester oder einem längeren Zeitraum) durch Steigerung der Anzahl an einzubindenden Aspekten wie folgt aussehen:

- Experiment 1: Überlegen Sie sich basierend auf dem physikalischen Zusammenhang zum XXX, in welchen Größenordnungen die Messwerte aufgenommen werden sollen.

- Experiment 2: ..., in welchen Größenordnungen die Messwerte abhängig von den Leistungsgrenzen ihres Messwerkzeuges aufgenommen werden sollen.

- Experiment 3: ..., in welchen Größenordnungen die Messwerte abhängig von den Leistungsgrenzen ihres Messwerkzeuges sowie des Gerätes XY aufgenommen werden sollen.

- Experiment 4: Welche Messpläne wären bei diesem experimentellen Setup inkl. Auswertungsmethodik denkbar? Wählen Sie begründet den Messplan aus, der eine möglichst präzise Beantwortung der Fragestellung ermöglicht.

Um dies auch in Praktika zu realisieren, in denen die Dozent:innen sehr viele Gruppen gleichzeitig betreuen, könnte man pro Experiment nur eine experimentelle Fähigkeit, d. h. eine Facette oder Subfacette der Dimension *Fachmethodik*, fokussieren.

Diese Öffnung der Instruktionen setzt voraus, dass die Student:innen geeignete Unterstützungsmaterialien erhalten, die ihnen die für die zu treffenden Entscheidungen einen Rahmen geben und die zu durchdenkenden Parameter sowie deren Einfluss auf den weiteren Prozess verdeutlichen. Hier eignen sich z. B. *handlungsorientierte Leitfäden*, wie der *Modelling Framework for Experimental Physics* (Abb. 37 von Dounas-Frazer und Lewandowski 2018). In diesem werden alle Kernaspekte, die in dieser Arbeit hinsichtlich des universitären Experimentierens identifiziert wurden, adressiert und gleichzeitig den Student:innen eine Struktur für ihre Entscheidungsprozesse vorgibt. Handlungsorientierte Leitfäden eignen sich dementsprechend besonders zu Beginn des Erwerbs experimenteller Fähigkeiten und Fertigkeiten und unterstützen die Student:innen dabei, elaboriertere Fähigkeiten und Fertigkeiten auszubilden. Experimentelle Strategien werden so nicht mehr mit einzelnen Experimenten verknüpft, vielmehr wird hiermit das implizite Prinzip offengelegt, sodass die Student:innen die Möglichkeit haben, die Fähigkeiten mit zunehmender Anzahl an Beispielexperimenten zu generalisieren (vgl. Reimann 1997, Reinhold, Lind und Friege 1999).

Neben einer geeigneten Unterstützung der Student:innen durch Materialien stellt die Betreuung am Experiment durch die Dozent:innen den wichtigsten Einflussfaktor für einen gelungenen Wissenserwerb dar. Heinicke bringt dies wie folgt auf den Punkt:

> "Allerdings sind diese [innovativen] Konzepte [für Laborpraktika] keineswegs didaktische Selbstläufer, wie viele Studien belegen. Der Erfolg ihrer Lernumgebung hängt vielmehr maßgeblich von der Motivation, dem Interesse und den Voraussetzungen der Lernenden ab. Ein noch stärkerer Faktor scheint aber vielen Kommentaren und Untersuchungen zufolge die Person des Betreuenden zu sein. [...] Ausbildung, Motivation und Haltungen der Betreuenden dem Praktikum gegenüber [legen] oftmals eine obere Grenze des Erfolgs der Veranstaltung fest [...]." (Heinicke 2012, S. 656)

Damit Student:innen zu Beginn ihrer experimentellen Ausbildung einen möglichst authentischen Einblick in das universitäre Experimentieren erhalten, kann darüber nachgedacht werden, ob die Dozent:innen mehr dazu angehalten werden sollten, während der Betreuung am Experiment mit den Student:innen über ihren eigenen Forschungsalltag zu sprechen. Dies würde den Student:innen nicht nur die Relevanz der experimentellen Fähigkeiten und Fertigkeiten für die Forschung verdeutlichen. Vielmehr ist hier zu vermuten[112], dass dies die Motivation der Student:innen für den Erwerb experimenteller Fähigkeiten deutlich steigern würde, weil ihnen deutlich wird, dass sie nicht nur tradierte Experimente "nach-

[112] Eine systematische Untersuchung des Zusammenhangs zwischen der Art der Betreuung in Laborpraktika und der Motivation der Student:innen stellt hier noch ein Desiderat dar.

machen"[113], sondern für die Zukunft relevante Fähigkeiten erwerben.

Der letzte Gedankengang dieser Arbeit soll der Ausbildung von Physiklehrer:innen gewidmet werden. Im Kapitel 2.2.3 ist diskutiert worden, dass angehende Lehrer:innen im Rahmen ihres Studiums nur ungenügend auf das Experimentieren im schulischen Bereich vorbereitet werden. Diese Studierendengruppe würde von einer Anpassung der Laborpraktika hin zu einer tiefer gehenden Analyse des experimentellen Vorgehens genau so viel profitieren, wie angehende Physiker:innen. Der systematische Erwerb experimenteller Fähigkeiten mit Fokus auf die Grundprinzipien des universitären Experimentierens würde ihnen einen elaborierteren Einblick in die Fachmethodik Experimentieren ermöglichen. Eine anschließende fachdidaktische Veranstaltung mit Fokus auf unterschiedliche Implementationen von Experimenten in den Schulunterricht mit dem Ziel, Aspekte des Konstruktes *Nature of Science* im Sinne des *scientific literacy* zu vermitteln, könnte hier angehende Lehrer:innen fundierter ausbilden.

Insgesamt kann also festgehalten werden, dass mit dem entwickelten performanzorientierten Kompetenzstrukturmodell universitären Experimentierens mit kleinen Anpassungen die Lehr-Lernumgebung Laborpraktika weiterentwickelt werden kann. Im Rahmen des Paderborner Physik Praktikums 3P sind einige der hier vorgeschlagen Maßnahmen in anderer Ausgestaltung[114] bereits umgesetzt worden. Die Proband:innen dieser Arbeit, die der Gruppe 2 angehören, haben das Anfängerlaborpraktikum 3P mit fachmethodischem Fokus durchlaufen. Sie zeigen deutlich höherwertige experimentelle Fähigkeiten, was deutlich für die Praktikabilität und Realisierbarkeit der vorherigen Vorschläge spricht.

[113] Erfahrungsgemäß haben die Student:innen dadurch, dass sie in Laborpraktika Experimente machen, die sie auch schon aus der Schule kennen, oder dadurch, dass sie ein Experiment mit dem Ziel ein Phänomen zu visualisieren, durchführen, nur geringe Motivation, sich tiefer gehend mit den Inhalten auseinanderzusetzen.

[114] Es wurden die Instruktionen geöffnet, indem die Tagesstruktur der Experimentiereinheiten verändert wurden. Weiterhin ist der Fähigkeitserwerb systematisch über vier Semester angelegt worden. Dieses Konzept eignet sich jedoch aufgrund des hohen Betreuungsaufwandes nicht für große Physikstudiengänge, weswegen hier alternative Vorschläge gemacht wurden. Weitergehende Informationen zum Konzept von 3P können ausgehend von Sacher und Bauer 2021 entnommen werden.

12. Verzeichnisse

Tabellenverzeichnis

1. Ergebnisse Dimension *Inhaltsbereiche* 109
2. Dimension Inhaltsbereiche Aufgabe 1 114
3. Materialien Aufgabe 1 115
4. Dimension Inhaltsbereiche Aufgabe 2 116
5. Vorläufige Facetten der Dimension Fachmethodik 162
6. Charakterisierung Stichprobe Experten-Novizen-Vergleich 168
7. Handlungsorientierte Indikatoren 197
8. Ergebnisse Interrating 216

Abbildungsverzeichnis

1. Visualisierung des Forschungsprozesses 26
2. Prozessbeschreibung Abduktion 30
3. Modell wissenszentriertes Problemlösen nach Friege (2001) 33
4. Modeling competence as a continuum 73
5. Modelle Experimenteller Kompetenz (Schule) 82
6. Rahmenmodell Miller - Assessmentansätze 89
7. Untersuchungsdesign 99
8. Datenanalyse - Dokumentarische Methode 101
9. Dimension *Inhaltsbereiche* 109
10. Schaltplan Aufgabe 2 117
11. Erhobene Daten 119
12. Datenanalyse - Dokumentarische Methode 133
13. Methodisches Vorgehen Auswertung 139
14. Notizen von Lea (Aufgabe 2, Expertin, nachgestellt) 145
15. Ergebnis Elisa Aufgabe 2 152
16. Ergebnis Piet Aufgabe 1 156
17. Experimentelles Setup Mia (Anfängerin, komplexe Aufgabe) . . . 158
18. Methodisches Vorgehen Dimension Fachmethodik 160
19. Beispiel: Formulierende Interpretation 161
20. Methodisches Vorgehen Dimension Qualitätsausprägung 164
21. Phasendiagramm Experten-Novizen-Vergleich 167
22. Vergleich Proband:innen Vernetzungsgrad 182
23. Handlungssteuerung Prozess Experimentieren Forschung 193
24. Facetten der Dimension Qualitätsausprägung 193

25. Modell Raster Teil 1 198
26. Modell Raster Teil 2 199
27. Performanzorientiertes Kompetenzstrukturmodell 201
28. Fähigkeitsprofile pro Aufgabe 204
29. Fähigkeitsprofile der Gruppen 205
30. Fähigkeitsprofile pro Konzept 206
31. Vergleich Performanz und Interview Messplan ableiten 209
32. Vergleich Performanz Interview Messergebnis beurteilen 209
33. Untersuchungsdesign mit Überprüfung der Güte 213
34. Auszug Expertenrating Handlungen 220
35. Übersicht Gruppenmerkmale Expertenrating 222
36. Ergebnisse Expertenrating 225
37. Modelling Framework for Experimental Physics 236
38. Übersicht Proband:innen - Leistungen 308
39. Übersicht Proband:innen - Bearbeitung 309
40. Ergebnis Experte Aufgabe 1 315

Literatur

Abd-El-Khalick, Fouad und Norman G. Lederman (2000). „Improving science teachers' conceptions of nature of science: a critical review of the literature". In: *International Journal of Science Education* 22.7, S. 665–701.

Akçayır, Murat u. a. (2016). „Augmented reality in science laboratories: The effects of augmented reality on university students' laboratory skills and attitudes toward science laboratories". In: *Computers in Human Behavior* 57, S. 334–342.

Alber, Ina, Birgit Griese und Martina Schiebel (2017). *Biografieforschung als Praxis der Triangulation*. Wiesbaden: Vieweg.

Albino, Judith E. u. a. (2008). „Assessing Dental Students' Competence: Best Practice Recommendations in the Performance Assessment Literature and Investigation of Current Practices in Predoctoral Dental Education". In: *Journal of Dental Education* 72.12, S. 1405–1435.

Albrecht, André und Volkhard Nordmeier (2011). „Ursachen des Studienabbruchs in Physik. Eine explorative Studie". In: *Die Hochschule : Journal für Wissenschaft und Bildung* 20.2, S. 131–145.

Alemani, M. (2017). *Forschendes Lernen im Physikpraktikum*. www.stifterverband.org/lehrfellowships/2017/alemani.

Alonzo, Alicia C. und Jeffrey T. Steedle (2009). „Developing and assessing a force and motion learning progression". In: *Science Education* 93.3, S. 389–421.

Altmeyer, Kristin u. a. (2020). „The use of augmented reality to foster conceptual knowledge acquisition in STEM laboratory courses—Theoretical background and empirical results". In: *British Journal of Educational Technology* 51.3, S. 611–628.

American Association of Physics Teachers (2014). *Recommendations for the Undergraduate Physics Laboratory Curriculum*.

Andersen, Jasmin (2020). *Entwicklung und Evaluierung eines spezifischen Anfängerpraktikums für Lehramtsstudierende im Fach Physik*. https://macau .uni-kiel .de/receive/macau_mods_00001409.

Anderson, John R. (1992). „Automaticity and the ACT* theory". In: *The American Journal of Psychology* 105.2, S. 165–180.

Arndt, Kerstin (2016). *Experimentierkompetenz erfassen: Analyse von Prozessen und Mustern am Beispiel von Lehramtsstudierenden der Chemie : Dissertation*. Bd. 202. Studien zum Physik- und Chemielernen. Berlin: Logos.

Arndt, Laura u. a. (2020). „NOS-Modellierungen – Ein theoretischer Konflikt mit fehlender empirischer Basis". In: *Progress in Science Education (PriSE)* 3.1, S. 35–45.

Arnold, Julia, Kerstin Kremer und Jürgen Mayer (2013). „Wissenschaftliches Denken beim Experimentieren: Kompetenzdiagnose in der Sekundarstufe II". In: *Erkenntnisweg Biologiedidaktik* 11, S. 7–20.

Aufschnaiter, Claudia von (2003). „Prozessbasierte Detailanalyse der Bildungsqualität von Physik-Unterricht: Eine explorative Studie". In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 9, S. 105–124.

Aufschnaiter, Claudia von und Christian Rogge (2010). „Wie lassen sich Verläufe der Entwicklung von Kompetenz modellieren?“ In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaft* 16, S. 95–114.

Aufschnaiter, Stefan von und Manuela Welzel (1997). „Wissensvermittlung durch Wissensentwicklung: Das Bremer Komplexitätsmodell zur quantitativen Beschreibung von Bedeutungsentwicklung und Lernen“. In: *ZfDN* 3.2, S. 43–58.

Barth, Johannes Maximilian (2014). *Experimentieren im Physikunterricht der gymnasialen Oberstufe: Eine Rekonstruktion übergeordneter Einbettungsstrategien*. Bd. 164. Studien zum Physik- und Chemielernen. Berlin: Logos.

Bauer, Anna B., Simon Lahme und Marc D. Sacher (2022). „Potenziale und Grenzen von Unterstützungsmaßnahmen zum wissenschaftlichen Schreiben im Paderborner Physik Praktikum 3P“. In: *PhyDid A - Physik und Didaktik in Schule und Hochschule* 21.

Bauer, Anna B., Marc D. Sacher u. a. (2021). „Laborpraktika auf Distanz: Ansätze in den Naturwissenschaften“. In: *Hochschule auf Abstand*. Hrsg. von Iris Neiske u. a. Hochschulbildung: Lehre und Forschung. Bielefeld: transcript Verlag, S. 155–168.

Bauer, Anna B. und Sacher Marc D. (2018). „Kompetenzorientierte, universitäre Laborpraktika: Das Paderborner Physik Praktikum (3P)“. In: *PhyDid B, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung 2018 in Würzburg*, S. 65–72.

Baumert, Jürgen, Wilfried Bos, Jens Brockmann u. a. (2000). *TIMSS/III–Deutschland Der Abschlussbericht: Zusammenfassung ausgewählter Ergebnisse der Dritten Internationalen Mathematik- und Naturwissenschaftsstudie zur mathematischen und naturwissenschaftlichen Bildung am Ende der Schullaufbahn*.

Baumert, Jürgen, Wilfried Bos und Rainer Watermann (2000). „Fachleistungen im voruniversitären Mathematik - und Physikunterricht im internationalen Vergleich“. In: *TIMSS/III*. Hrsg. von Jürgen Baumert, Wilfried Bos und Rainer Lehmann. Opladen: Leske + Budrich, S. 129–180.

Baur, Armin (2018). „Fehler, Fehlkonzepte und spezifische Vorgehensweisen von Schülerinnen und Schülern beim Experimentieren“. In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 11.1, S. 7.

Baxter, Gail und Richard J. Shavelson (1994). „Science performance assessments: Benchmarks and surrogates“. In: *International Journal of Educational Research* 21.3, S. 279–298.

Bennett, Jeffrey u. a. (2020). *Astronomie: Die kosmische Perspektive*. 9., aktualisierte Auflage. Studium Physik. München: Pearson Deutschland.

Bernholt, Sascha (2010). *Kompetenzmodellierung in der Chemie: Theoretische und empirische Reflexion am Beispiel des Modells hierarchischer Komplexität*. Bd. 98. Studien zum Physik- und Chemielernen. Berlin: Logos-Verl.

Bernholt, Sascha, Ilka Parchmann und Michael Lamport Commons (2009). „Kompetenzmodellierung zwischen Forschung und Unterrichtspraxis“. In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 15, S. 219–245.

Beschlüsse der Kultusministerkonferenz (2005). *Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss (Jahrgangsstufe 10)*. Hrsg. von Sekretariat der

Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland. Wolters Kluwer Deutschland GmbH, München, Neuwied.
Billion-Kramer, Tim u. a. (2020). „Professionswissen angehender Lehrkräfte zum Konstrukt Nature of Science (NOS): Entwicklung und Validierung eines Vignettentests (EKoL-NOS)“. In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 26.1, S. 53–72.
Blömeke, Sigrid, Jan-Eric Gustafsson und Richard J. Shavelson (2015). „Beyond Dichotomies“. In: *Zeitschrift für Psychologie* 223.1, S. 3–13.
Blömeke, Sigrid und Olga Zlatkin-Troitschanskaia (2022). *Kompetenzen im Hochschulsektor (KoKoHs)*. https://www.kompetenzen -im -hochschulsektor.de/.
Bohnsack, Ralf (1999). *Rekonstruktive Sozialforschung*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
– (2012). „Orientierungsschemata, Orientierungsrahmen und Habitus“. In: *Qualitative Bildungs- und Arbeitsmarktforschung*. Hrsg. von Karin Schittenhelm. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 119–153. ISBN: 978-3-531-17719-9.
Bohnsack, Ralf, Alexander Geimer und Michael Meuser, Hrsg. (2018). *Hauptbegriffe qualitativer Sozialforschung*. 4., vollst. überarbeitete und erweiterte Auflage. Bd. 8226. UTB Erziehungswissenschaft, Sozialwissenschaft. Opladen und Toronto: Verlag Barbara Budrich.
Bohnsack, Ralf, Iris Nentwig-Gesemann und Arnd-Michael Nohl, Hrsg. (2013). *Die dokumentarische Methode und ihre Forschungspraxis: Grundlagen qualitativer Sozialforschung*. 3., aktualisierte Aufl. Wiesbaden: Springer VS.
Bonnet, Andreas (2009). „Die Dokumentarische Methode in der Unterrichtsforschung: Ein integratives Forschungsinstrument für Strukturrekonstruktion und Kompetenzanalyse“. In: *ZQF* 10.2, S. 219–240.
Börlin, Johannes und Peter Labudde (2014). „Practical Work in Physics Instruction: An Opportunity to learn?“ In: *Quality of instruction in physics*. Hrsg. von Hans E. Fischer. Münster: Waxmann, S. 111–128.
Brandenburger, Martina (2016). „Was beeinflusst den Erfolg beim Problemlösen in der Physik?“ Dissertation. Logos Verlag Berlin GmbH.
Breidbach, Olaf u. a., Hrsg. (2010). *Experimentelle Wissenschaftsgeschichte*. Bd. Band 3. Laboratorium Aufklärung. München und Paderborn: Wilhelm Fink.
Bromme, Rainer (1992). *Der Lehrer als Experte. Zur Psychologie professionellen Wissens*. Bern: Hans Huber Verlag.
Brownell, Sara E. u. a. (2012). „Undergraduate Biology Lab Courses: Comparing the Impact of Traditionally Based "Cookbookänd Authentic Research-Based Courses on Student Lab Experiences“. In: *Journal of College Science Teaching* 41, S. 18–27.
Brüggemann, Volker (2021). *Entwicklung und Pilotierung eines adaptiven Multistage-Tests zur Kompetenzerfassung im Bereich naturwissenschaftlichen Denkens*. Bd. Band 316. Studien zum Physik- und Chemielernen. Logos Verlag.
Burdinski, Dirk (2018). „Flipped Lab: Ein verdrehtes Laborpraktikum“. In: *Digitalisierung und Hochschulentwicklung*. Hrsg. von Barbara Getto, Patrick Hintze und

Michael Kerres. Medien in der Wissenschaft. Münster und New York: Waxmann, S. 164–172.
Bybee, Rodger W. (1997). *Achieving scientific literacy: From purposes to practices*. Portsmouth, NH: Heinemann.
Cahan, D. (1992). *Meister der Messung: Die physikalisch-technische Reichsanstalt im Deutschen Kaiserreich: Forschen – Messen – Prüfen*. Basel: Weinheim.
Calderhead, J. (1981). „Stimulated Recall: A Method for Reseach on Teaching". In: *Br. J. educ. Psychol.* 51, S. 211–217.
Chandler, P. und J. Sweller (1991). „Cognitive Load Theory and the Format of Instruction". In: *Cognition and Instruction* 8.4, S. 293–332.
Chi, Michelene, Paul Feltovich und Robert Glaser (1981). „Categorization and Representation of Physics Problems by Experts and Novices". In: *Cognitive Science* 5, S. 121–152.
Chi, Michelene, Robert Glaser und Marshall J. Farr, Hrsg. (1988). *The Nature of Expertise*. New York: Psychology Press.
Chi, Michelene, Robert Glaser und Ernest Rees (1982). „Expertise in Problem Solving". In: *Advances in the psychology of human intelligence*. Hrsg. von Robert J. Sternberg. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates, S. 7–75.
Chomsky, N. (1973). *Sprache und Geist*. Frankfurt am Main.
Clement, John J. (2008). *Creative model construction in scientists and students*. Dordrecht: Springer.
Clough, Michael P. (2006). „Learners' Responses to the Demands of Conceptual Change: Considerations for Effective Nature of Science Instruction". In: *Science & Education* 15.5, S. 463–494.
Collins, A., J. S. Brown und A. Holum (1991). „Cognitive Apprenticeship: Making thinking visible". In: *American Educator* 4.
Commons, M. L. u. a. (1998). „Hierarchical Complexity of Tasks Shows the Existence of Developmental Stages". In: *Developmental Review* 18, S. 237–278.
Deeken, Christoph, Irene Neumann und Aiso Heinze (2020). „Mathematical Prerequisites for STEM Programs: What do University Instructors Expect from New STEM Undergraduates?" In: *International Journal of Research in Undergraduate Mathematics Education* 6.1, S. 23–41.
Diemer, Uli, Björn Baser und Hans-Jörg Jodl (1999). *Computer im Praktikum: Moderne physikalische Versuche*. Berlin [u.a.] : Springer.
Döring, Nicola und Jürgen Bortz (2016). *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
Dounas-Frazer, Dimitri R. und H. J. Lewandowski (2018). „The Modelling Framework for Experimental Physics: description, development, and applications". In: *European Journal of Physics* 39.6.
Dürr, Rolf (2016). *Mathematik Zwischen Schule und Hochschule: Den Übergang Zu Einem WiMINT-Studium Gestalten - Ergebnisse Einer Fachtagung, Esslingen 2015*. Wiesbaden: Springer Fachmedien GmbH.

Egan, D. E. und B. J. Schwarz (1979). „Chunking in recall of symbolic drawings". In: *Memory and Cognition* 7, S. 149–158.
Emden, Markus (2011). *Prozessorientierte Leistungsmessung des naturwissenschaftlich-experimentellen Arbeitens: Eine vergleichende Studie zu Diagnoseinstrumenten zu Beginn der Sekundarstufe I*. Bd. 118. Studien zum Physik- und Chemielernen. Berlin: Logos.
Emden, Markus und Armin Baur (2016). „Effektive Lehrkräftebildung zum Experimentieren – Entwurf eines integrierten Wirkungs- und Gestaltungsmodells". In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 88.3, S. 397.
Empfehlung der Konferenz der Fachbereiche Physik (2010). *Zur Konzeption von Bachelor- und Masterstudiengängen in der Physik*. www.kfp-physik.de.
– (18. Mai 2016). *Gute wissenschaftliche Praxis*. www.kfp-physik.de.
Ericsson, Karl A., Hrsg. (1991). *Toward a general theory of expertise: Prospects and limits*. 1. publ. Cambridge u.a.: Cambridge Univ. Pr.
Ericsson, Karl A. und Neil Charness (1994). „Expert Performance: Its Structure and Acquisition". In: *American Psychologist* 49.8, S. 725–747.
Ericsson, Karl A. und Herbert A. Simon (1999). *Protocol analysis: Verbal reports as data*. Rev. ed., 3. print. A Bradford book. Cambridge, Mass.: MIT Press.
Etkina, Eugenia, Anna Karelina u. a. (2010). „Design and Reflection Help Students Develop Scientific Abilities: Learning in Introductory Physics Laboratories". In: *Journal of the Learning Sciences* 19.1, S. 54–98.
Etkina, Eugenia, Alan van Heuvelen u. a. (2006). „Scientific abilities and their assessment". In: *Physical Review Special Topics - Physics Education Research* 2.2, S. 113.
Fabel-Lamla, Melanie und Sandra Tiefel (2003). „Fallrekonstuktionen in Forschung und Praxis: Einführung in den Themenschwerpunkt". In: *Zeitschrift für qualitative Bildungs-, Beratungs- und Sozialforschung* 4.2, S. 189–198.
Fischler, Helmut (2008). „Physikdidaktisches Wissen und Handlungskompetenz". In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 14, S. 27–49.
Flick, Uwe (2005a). *Qualitative Sozialforschung: Eine Einführung*. 3. Aufl. Reinbek: Rowohlt Taschenbuch.
– (2005b). „Standards, Kriterien, Strategien: zur Diskussion über Qualität qualitativer Sozialforschung". In: *Zeitschrift für qualitative Bildungs-, Beratungs- und Sozialforschung* 6.2, S. 191–210.
– (2019). „Gütekriterien qualitativer Sozialforschung". In: *Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung*. Hrsg. von Nina Baur und Jörg Blasius. Wiesbaden: Springer VS, S. 473–488.
Flick, Uwe, Ernst von Kardorff und Heiner Keupp, Hrsg. (1995). *Handbuch qualitative Sozialforschung: Grundlagen, Konzepte, Methoden und Anwendungen*. 2. Aufl. Grundlagen Psychologie. Weinheim: Beltz.
Fraß, S., C. Weyers und Heidrun Heinke (2014). „Können IBE experimentelle Fertigkeiten vermitteln? Entwicklung eines prozessorientierten Analyseinstrumentes". In: *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*.

Fricke, Annika (2018). *Interaktive Skripte Im Physikalischen Praktikum: Entwicklung und Evaluation Von Hypermedien Für Die Nebenfachausbildung*. Bd. 253. Studien Zum Physik- und Chemielernen Ser. Berlin: Logos Verlag Berlin.

Friege, Gunnar (2001). *Wissen und Problemlösen: Eine empirische Untersuchung des wissenszentrierten Problemlösens im Gebiet der Elektrizitätslehre auf der Grundlage des Experten-Novizen-Vergleichs: Zugl.: Kiel, Univ., Diss., 2001*. Bd. 19. Studien zum Physiklernen. Berlin: Logos-Verl.

Funke, Joachim (2003). *Problemlösendes Denken*. 1. Aufl. Einführungen und Allgemeine Psychologie. Stuttgart: Kohlhammer.

Galison, P. L. (1987). *How experiments end*. Chicago: University of Chicago Press.

Geller, Cornelia, Jonas Schneider und Heike Theyßen (2020). „Finde die Fehler! Experimentelle Testaufgaben zur Evaluation eines Experimentalpraktikums." In: *Naturwissenschaftliche Kompetenzen in der Gesellschaft von morgen*. Hrsg. von Sebastian Habig. Universität Duisburg-Essen, S. 900–904.

Geschke, Dieter, Hrsg. (2001). *Physikalisches Praktikum*. 12., durchgesehene Auflage. Springer eBook Collection Life Science and Basic Disciplines. Wiesbaden: Teubner.

Glaesser, Judith u. a. (2009). „Underlying success in open–ended investigations in science: using qualitative comparative analysis to identify necessary and sufficient conditions". In: *Research in Science & Technological Education* 27.1, S. 5–30.

Goertz, Simon u. a. (2019). „Die Plattform „FLexKom" zur Förderung experimenteller Kompetenzen: Konzept und Einsatzbeispiele". In: *PhyDid B - Didaktik der Physik- Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung in Aachen*, S. 265–272.

Gooding, D. (1992). „Putting Agency Back into Experiment". In: *Science as practice and culture*. Hrsg. von Andrew Pickering. Chicago: Univ. of Chicago Press, S. 65–112.

Gott, R. und S. Duggan (1996). „Practical work: Its role in the understanding of evidence in science". In: *International Journal of Science Education* 18.7, S. 791–806.

Groeben, Norbert u. a. (1988). *Das Forschungsprogramm Subjektive Theorien: Eine Einführung in die Psychologie des reflexiven Subjekts*. Tübingen: Francke.

Gruber, Hans (1999). *Erfahrung als Grundlage kompetenten Handelns*. 1. Aufl. Psychologie Forschung. Bern: Huber. ISBN: 3-456-83241-9.

Gruber, Hans und Heinz Mandl (1996). „Expertise und Erfahrung". In: *Expertiseforschung: Theoretische und methodische Grundlagen*. Hrsg. von Hans Gruber und Albert Ziegler. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, S. 18–34.

Gruber, Hans und Albert Ziegler, Hrsg. (1996). *Expertiseforschung: Theoretische und methodische Grundlagen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.

Gut, Christoph u. a. (2014). „Problemtypenbasierte Modellierung und Messung experimenteller Kompetenzen von 12- bis 15-jährigen Jugendlichen: Didaktik der Physik: Frühjahrstagung". In: *PhyDid B - Didaktik der Physik- Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung in Frankfurt*, S. 1–9.

Gut-Glanzmann, Christoph (2012). *Modellierung und Messung experimenteller Kompetenz: Analyse eines large-scale Experimentiertests: Univ., Diss.–Basel, 2012*. Bd. 134. Studien zum Physik- und Chemielernen. Berlin: Logos.
Gut-Glanzmann, Christoph und Jürgen Mayer (2018). „Experimentelle Kompetenz". In: *Theorien in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*. Hrsg. von Dirk Krüger, Ilka Parchmann und Horst Schecker. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 121–140.
Hacking, Ian (1992). „The Self-Vindication of the Laboratory Sciences". In: *Science as practice and culture*. Hrsg. von Andrew Pickering. Chicago: Univ. of Chicago Press, S. 29–64.
– (1996). *Einführung in die Philosophie der Naturwissenschaften: Representing and intervening*. Bd. Nr. 9442. Reclams Universal-Bibliothek. Stuttgart: Reclam.
Hackling, M. W. und P. J. Garnett (1990). „Year 12 Students' attainment of scientific investigation skills". In: *Research in Science Education* 20, S. 134–141.
– (1991). „Primary and secondary school students' attainment of science investigation skills". In: *Research in Science Education* 21, S. 161–170.
– (1992). „Expert-Novice differences in science investigation skills". In: *Research in Science Education* 22, S. 170–177.
– (1995). „The development of expertise in science investigation skills". In: *The Australian science teachers journal* 41.4, S. 80–88.
Haller, Kerstin (1999). *Über den Zusammenhang von Handlungen und Zielen: Eine empirische Untersuchung zu Lernprozessen im physikalischen Praktikum: Univ., Diss.–Bremen, 1999*. Bd. 5. Studien zum Physiklernen. Berlin: Logos-Verl.
Hammann, Marcus (2004). „Kompetenzentwicklungsmodelle: Merkmale und ihre Bedeutung dargestellt anhand von Kompetenzen beim Experimentieren". In: *MNU* 57/4, S. 196–203.
Hammann, Marcus u. a. (2008). „Assessing pupils' skills in experimentation". In: *Journal of Biological Education* 42.2, S. 66–72.
Härtig, Hendrik, Knut Neumann und Roger Erb (2017). „Experimentieren als Interaktion von Situation und Person". In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 39.1, S. 14.
Hartmann, S. u. a. (2015). „Kompetenzen der naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung als Teil des Professionswissens zukünftiger Lehrkräfte: Das Projekt Ko-WADiS". In: *Kompetenzerwerb an Hochschulen: Modellierung und Messung*. Hrsg. von Barbara Koch-Priewe u. a. Bad Heilbrunn: Verlag Julius Klinkhardt, S. 39–58.
Häußler, Peter u. a. (1988). *Physikalische Bildung für heute und morgen: Ergebnisse einer curricularen Delphi-Studie = Education in physics for today and tomorrow*. Bd. 116. IPN. Kiel: Univ. Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften.
Heering, Peter (2000). „Getting Schocks: Teaching Secondary School Physics Through History". In: *Science & Education* 9.4, S. 363–373.
Heidrich, Jan (2017). *Erfassung von Experimentierkompetenz im universitären Kontext: Entwicklung und Validierung eines Experimentiertests zum Themenbereich Optik*. Kiel.

Heinicke, Susanne (2012). *Aus Fehlern wird man klug: Eine genetisch-didaktische Rekonstruktion des "Messfehlers": Zugl.: Oldenburg, Univ., Diss., 2011*. Berlin: Logos-Verl.

Hodson, Derek (1993). „Re-thinking Old Ways: Towards A More Critical Approach To Practical Work In School Science". In: *Studies in Science Education* 22.1, S. 85–142.

– (1996). „Laboratory work as scientific method: Three decades of confusion and distortion". In: *Journal of Curriculum Studies* 28.2, S. 115–135.

Hofstein, Avi und Vincent N. Lunetta (1982). „The Role of the Laboratory in Science Teaching: Neglected Aspects of Research". In: *Review of Educational Research* 52.2, S. 201–217.

– (2004). „The laboratory in science education: Foundations for the twenty-first century". In: *Science Education* 88.1, S. 28–54.

Holmes, Natasha G. und Carl E. Wieman (2018). „Introductory physics labs: We can do better". In: *Physics Today* 71.1, S. 38–45.

Holmes, Natasha G., Carl E. Wieman und D. A. Bonn (2015). „Teaching critical thinking". In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 112.36, S. 11199–11204.

Holz, C. und Susanne Heinicke (2018). „Alles Reibung oder was? Welchen Effekt oft genannte Einflüsse tatsächlich auf Messergebnisse haben". In: *PhyDid B, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung* Würzburg, S. 339–344.

Höttecke, Dietmar (2001). *Die Natur der Naturwissenschaften historisch verstehen: Fachdidaktische und wissenschaftshistorische Untersuchungen: Zugl.: Oldenburg, Univ., Diss., 2000*. Bd. 16. Studien zum Physiklernen. Berlin: Logos-Verl.

Höttecke, Dietmar, Andreas Henke und Falk Rieß (2012). „Implementing History and Philosophy in Science Teaching: Strategies, Methods, Results and Experiences from the European HIPST Project". In: *Science & Education* 21.9, S. 1233–1261.

Höttecke, Dietmar und Falk Rieß (2015). „Naturwissenschaftliches Experimentieren im Lichte der jüngeren Wissenschaftsforschung – Auf der Suche nach einem authentischen Experimentbegriff der Fachdidaktik: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften". In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 21.1, S. 127–139.

Hoyningen-Huene, Paul (1989). *Die Wissenschaftsphilosophie Thomas S. Kuhns: Rekonstruktion und Grundlagenprobleme*. Bd. 27. Wissenschaftstheorie Wissenschaft und Philosophie. Wiesbaden und s.l.: Vieweg+Teubner Verlag.

– (2006). „Context of Discovery versus Context of Justification and Thomas Kuhn". In: *Revisiting Discovery and Justification: Historical and philosophical perspectives on the context distinction*. Hrsg. von Jutta Schickore und Friedrich Steinle. Archimedes. Dordrecht: Springer, S. 119–132. ISBN: 1-4020-4250-7.

Huber, L. (1998). „Forschendes Lehren und Lernen - eine aktuelle Notwendigkeit". In: *Das Hochschulwesen* 46.1, S. 3–11.

– (2009). „Warum Forschendes Lernen nötig und möglich ist". In: *Forschendes Lernen im Studium: Aktuelle Konzepte und Erfahrungen*. Hrsg. von Ludwig Huber,

Julia Hellmer und Friederike Schneider. Motivierendes Lehren und Lernen in Hochschulen. Bielefeld: UVW Universitäts Verlag Webler.
Hucke, Lorenz (2000). *Handlungsregulation und Wissenserwerb in traditionellen und computergestützten Experimenten des physikalischen Praktikums: Univ., Diss.–Dortmund, 1999*. Bd. 8. Studien zum Physiklernen. Berlin: Logos-Verl.
Hund, Friedrich (1987). *Die Geschichte der Göttinger Physik*. Bd. 80. Göttinger Universitätsreden. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht.
Institut zur Qualitätsentwicklung im Bildungswesen (2011). *Kompetenzstufenmodelle zu den Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss: Kompetenzbereiche „Fachwissen" und „Erkenntnisgewinnung": Beschluss der Kultusministerkonferenz (KMK) vom 08.12.2011*. https://www .iqb .hu-berlin .de/bista/ksm.
Jahnke, I. u. a. (2010). „Online learning with remote-configured experiments". In: *DeLFI 2010 - 8. Tagung der Fachgruppe E-Learning der Gesellschaft für Informatik e.V*. Hrsg. von Kerres, M., Ojstersek, N., Schroeder, U. & Hoppe, U. Bonn: Gesellschaft für Informatik e.V, S. 265–277.
Jiang, Feng und William F. McComas (2015). „The Effects of Inquiry Teaching on Student Science Achievement and Attitudes: Evidence from Propensity Score Analysis of PISA Data". In: *International Journal of Science Education* 37.3, S. 554–576.
Johnson, Eric J. (1988). „Expertise and decision under uncertainty: Performance and process". In: *The Nature of Expertise*. Hrsg. von Michelene Chi, Robert Glaser und Marshall J. Farr. New York: Psychology Press, S. 209–228.
Johnson, Todd R. und Josef F. Krems (2001). „Use of current explanations in multicausal abductive reasoning". In: *Cognitive Science* 25, S. 903–939.
Joußen, Norman, Jasmin Thiel und Heidrun Heinke (2019). „Scaffolding im Anfängerpraktikum für Lehramtsstudierende". In: *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung* Aachen, S. 105–110.
Kane, Michael (2013). „Validating the Interpretations and Uses of Test Scores". In: *Journal of Educational Measuerement* 50.1, S. 1–73.
Kattmann, Ulrich u. a. (1997). „Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion: Ein Rahmen für naturwissenschaftsdidaktische Forschung und Entwicklung". In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaft* 3.3, S. 3–18.
Kauertz, Alexander (2008). *Schwierigkeitserzeugende Merkmale physikalischer Leistungstestaufgaben: Essen, Univ., Diss.–Duisburg, 2007*. Bd. 79. Studien zum Physik- und Chemielernen. Berlin: Logos-Verl.
Kauertz, Alexander, Hans E. Fischer und Jürgen Mayer (2010). „Standardbezogene Kompetenzmodellierung in den Naturwissenschaften der Sekundarstufe I". In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaft* 16, S. 135–153.
Kempa, Richard (1986). *Assessment in science*. Reprint. Cambridge science education series. Cambridge: Cambridge University Press.
Kircher, Ernst, Raimund Girwidz und Hans E. Fischer (2020). *Physikdidaktik | Grundlagen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Klahr, David (2000). *Exploring Science: The cognition and development of discovery process*. Cambridge: The MIT Press.

Klahr, David und Kevin Dunbar (1988). „Dual Space Search During Scientific Reasoning". In: *Cognitive Science* 12.1, S. 1–48.

Kleickmann, Thilo u. a. (2010). „Die Modellierung naturwissenschaftlicher Kompetenz im Grundschulalter: Theoretische Konzeption und Testkonstruktion". In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaft* 16, S. 265–283.

Klieme, Eckhard, Hermann Avenarius u. a. (2003). *Zur Entwicklung nationaler Bildungsstandards: Eine Expertise*. Bd. 1. Bildungsforschung. Bonn, Berlin.

Klieme, Eckhard und Johannes Hartig (2008). „Kompetenzkonzepte in den Sozialwissenschaften und im erziehungswissenschaftlichen Diskurs". In: *Kompetenzdiagnostik*. Hrsg. von Manfred Prenzel, Ingrid Gogolin und Heinz-Hermann Krüger. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, S. 11–29.

Klieme, Eckhard und Detlev Leutner (2006). „Kompetenzmodelle zur Erfassung individueller Lernergebnisse und zur Bilanzierung von Bildungsprozessen: Beschreibung eines neu eingerichteten Schwerpunktprogramms der DFG". In: *Zeitschrift für Pädagogik* 52.6, S. 876–903.

KMK (2020). *Bildungsstandards im Fach Physik für die Allgemeine Hochschulreife: Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 18.06.2020*. 1. Auflage. Köln: Carl Link Verlag. ISBN: 978-3-556-09045-9.

Knoke, Mareike (2021). *Hochschullehre: „Ich will Studierende für das unerschrockene Experimentieren begeistern"*.

Kohlrausch, Friedrich (1870). *Kleiner Leitfaden der Praktischen Physik*. Leipzig.

Kreiten, M., A. Bresges und A. Schadschneider (2010). „Möglichkeiten von interaktiven 3d-Simulationen zur Unterstützung von Versuchen im physikalischen Praktikum". In: *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*.

Krüger, Dirk und Annette Upmeier zu Belzen (2021). „Kompetenzmodell der Modellierkompetenz – Die Rolle abduktiven Schließens beim Modellieren". In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 27.1, S. 127–137.

Krüger, Dirk, Annette Upmeier zu Belzen und S. Hartmann (2016). „ValiDiS – Kompetenzmodellierung und -erfassung: Validierungsstudie zum wissenschaftlichen Denken im naturwissenschaftlichen Studium". In: *Kompetenzmodelle und Instrumente der Kompetenzerfassung im Hochschulsektor*. Hrsg. von Hans Anand Pant u. a. KoKoHsWorkingPapers. Berlin, Mainz: Humboldt Universität, Johannes Gutenberg Universität, S. 22–25.

Kuckartz, Udo (2012). *Qualitative Inhaltsanalyse: Methoden, Praxis, Computerunterstützung*. Weinheim u.a.: Beltz Juventa.

Kuhn, Thomas S. (1962). *The Structure of scientific revolutions*. Bd. No. 2. International encyclopedia of unified science Foundations of the unity of science. Chicago: Univ. of Chicago Press.

Labudde, Peter (2000). *Konstruktivismus im Physikunterricht der Sekundarstufe II: Zugl.: Bern, Univ., Habil.-Schr., 1999*. Bd. 5. Schulpädagogik - Fachdidaktik - Lehrerbildung. Bern, Stuttgart und Wien: Haupt.

Lammertz, Ines und Heidrun Heinke (2016). „Wissenschaftliches Schreiben und Peer-Feedback: Lerngelegenheiten im Physikpraktikum“. In: *Zeitschrift für Hochschulentwicklung* 11.2, S. 147–161.
Lamnek, S. (2010). *Qualitative Sozialforschung: Lehrbuch*. 5. Weinheim [u.a.]: Beltz.
Larkin, J. H. (1977). „Problem solving in physics“. Working Paper. Berkeley: University of California.
– (1981). „Enriching formal knowledge: A model for learning to solve textbook physics problems“. In: *Cognitive skills and their acquisition*. Hrsg. von John Robert Anderson. Hillsdale, N.J: L. Erlbaum Associates, S. 311–334.
Leutner, Detlev u. a. (2012). „Analytische und dynamische Problemlösekompetenz im Lichte internationaler Schulleistungsvergleichsstudien“. In: *Psychologische Rundschau* 63.1, S. 34–42.
Lind, Gunter (1996). „Die Anfänge des Experimentalunterrichts“. In: *Physik in der Schule* 2.34, S. 57–59.
Lind, Gunter und Gunnar Friege (2003). „Wissen und Problemlösen - Eine Untersuchung zur Frage des „trägen Wissens"“. In: *Zeitschrift zu Theorie und Praxis erziehungswissenschaftlicher Forschung* 17.1, S. 57–85.
Lunetta, Vincent N. (1998). „The school science laboratory: Historical perspectives and contexts for contemporary teaching“. In: *International handbook of Science Education*. Hrsg. von Barry J. Fraser und Kenneth Tobin. Dordrecht: Kluwer, S. 249–264.
Lunetta, Vincent N., Avi Hofstein und Michael P. Clough (2007). „Learning and Teaching in the School Science Laboratory: An analysis of research, theory and practice“. In: *Handbook of Research on Science Education*. Hrsg. von N. Lederman und S. Abel. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum, S. 393–441.
Lunetta, Vincent N. und Pinchas Tamir (1979). „Matching Lab Activities with Teaching Goals“. In: *Science Teacher* 46.5, S. 22–24.
Maichle, Ulla (1985). *Wissen, Verstehen und Problemlösen im Bereich der Physik: Zugl.: Mannheim, Univ., Diss., 1984*. Bd. 150. Europäische Hochschulschriften Reihe 6, Psychologie. Frankfurt am Main: Lang.
Maiseyenka, Veranika (2014). *Modellbasiertes Experimentieren im Unterricht: Praxistauglichkeit und Lernwirkungen*. Bd. 166. Studien zum Physik- und Chemielernen. Berlin: Logos.
Maiseyenka, Veranika, Horst Schecker und Dennis Nawrath (2013). „Kompetenzorientierung des naturwissenschaftlichen Unterrichts - Symbiotische Kooperation bei der Entwicklung eines Modells experimenteller Kompetenz“. In: *PhyDid A - Physik und Didaktik in Schule und Hochschule* 1.12, S. 1–17.
Manthei, W. (1995). „Der Physikunterricht im Wandel der Zeit: Physik in der Schule“. In: 33.10, S. 347–349.
Martens, Matthias und Barbara Asbrand (2009). „Rekonstruktion von Handlungswissen und Handlungskompetenz: Auf dem Weg zu einer qualitativen Kompetenzforschung“. In: *ZQF* 10.2, S. 201–217.

Mayer, Jürgen (2007). „Erkenntnisgewinnung als wissenschaftliches Problemlösen“. In: *Theorien in der biologiedidaktischen Forschung*. Hrsg. von Dirk Krüger. Springer-Lehrbuch. Berlin und Heidelberg: Springer, S. 177–186.

Mayer, Jürgen und Nicole Wellnitz (2014). „Die Entwicklung von Kompetenzstrukturmodellen“. In: *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*. Hrsg. von Dirk Krüger, Ilka Parchmann und Horst Schecker. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 19–29.

Mayring, Philipp und Thomas Frenzl (2019). „Qualitative Inhaltsanalyse“. In: *Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung*. Hrsg. von Nina Baur und Jörg Blasius. Wiesbaden: Springer VS, S. 633–648.

McComas, William F., Hrsg. (2002). *The Nature of Science in Science Education*. Science & Technology Education Library. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

McComas, William F., Michael P. Clough und Hiya Almazroa (2002). „The Role and Character of the Nature of Science in Science Education“. In: *The Nature of Science in Science Education*. Hrsg. von William F. McComas. Bd. 5. Science & Technology Education Library. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, S. 3–39.

McKnight, Patrick E. und Julius Najab (2010). „Mann-Whitney U Test“. In: *The Corsini Encyclopedia of Psychology*. Hrsg. von Irving B. Weiner und W. Edward Craighead. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.

Mclaughlin, Peter (1995). „Der neue Experimentalismus in der Wissenschaftstheorie“. In: *Experimentalisierung des Lebens*. Hrsg. von Hans-Jörg Rheinberger und Michael Hagner. Berlin, Boston: De Gruyter, S. 207–218.

Meier, Monique (2016). *Entwicklung und Prüfung eines Instrumentes zur Diagnose der Experimentierkompetenz von Schülerinnen und Schülern*. Bd. 13. BIOLOGIE lernen und lehren. Berlin: Logos.

Merli, Andrea, Birgit Kanngießer und Thomas Möller (2020). „Kreatives forschendes Lernen im Projektpraktikum Physik fördern“. In: *Labore in der Hochschullehre: Didaktik, Digitalisierung, Organisation*. Hrsg. von C. Terkowsky u. a. Hochschule und Wissenschaft. Bielefeld: wbv, S. 67–80.

Messmer, Roland (2015). „Stimulated Recall als fokussierter Zugang zu Handlungs- und Denkprozessen von Lehrpersonen“. In: *FQS* 16.1, Art. 3.

Meyer, Michael (2009). „Abduktion, Induktion – Konfusion“. In: *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft* 12.2, S. 302–320.

Millar, R. u. a. (1996). „Children's performance of investigative tasks in science: a framework for considering progression“. In: *Progression in learning*. Hrsg. von Martin Hughes. BERA dialogues. Clevedon England: Multilingual Matters.

Miller, George E. (1990). „The Assessment of Clinical Skills/ Competence/ Performance“. In: *Academic Medicine* 65.9 September Supplement, S. 63–67.

Muckenfuß, Heinz (1995). *Lernen im sinnstiftenden Kontext: Entwurf einer zeitgemäßen Didaktik des Physikunterrichts*. Berlin: Cornelsen.

Müller-Ruckwitt, Anne (2008). *"Kompetenz Bildungstheoretische Untersuchungen zu einem aktuellen Begriff: Zugl.: Bonn, Univ., Diss., 2007*. Bd. 6. Bibliotheca Academica Reihe Pädagogik. Würzburg: Ergon-Verl.

Murphy, Colette (2022). *Vygotsky and Science Education*. Cham: Springer International Publishing.

Muth, Laura (2018). *Einfluss der Auswertephase von Experimenten im Physikunterricht: Ergebnisse einer Interventionsstudie zum Zuwachs von Fachwissen und experimenteller Kompetenz von Schülerinnen und Schülern*. Bd. 252. Studien zum Physik- und Chemielernen. Berlin: Logos Verlag.

Nagel, Clemens (2009). *eLearning im physikalischen Anfängerpraktikum*. Wien.

Nagel, Clemens und Silas Oppermann (2018a). „Zur Effektivität von Lernvideos in der Vorbereitung auf das physikalische Anfängerpraktikum: Eine kriterienbasierte Evaluation". In: *PhyDid A - Physik und Didaktik in Schule und Hochschule* 1/17, S. 66–87.

– (2018b). „Zur Effektivität von Lernvideos in der Vorbereitung auf das physikalische Anfängerpraktikum: Eine kriterienbasierte Evaluation". In: *PhyDid A - Physik und Didaktik in Schule und Hochschule* 1/17, S. 66–87.

Nagel, Clemens, Rüdiger Scholz und Kim-Allesandro Weber (2018). „Umfrage zu Lehr/Lernzielen in physikalischen Praktika". In: *PhyDid B - Didaktik der Physik-DPG-Schule Physikalische Praktika, Bad Honnef*, S. 97–109.

Nagel, Clemens und Brigitte Wolny (2013). „Ein adressatenspezifisches Physikpraktikum für Ernährungswissenschaften: Didaktische Rekonstruktion und Evaluation". In: *Physik und Didaktik in Schule und Hochschule* 12.1, S. 48–61.

Nawrath, Dennis, Veranika Maiseyenka und Horst Schecker (2011). „Experimentelle Kompetenz–Ein Modell für die UnterrichtspraxisExperimentelle Kompetenz–Ein Modell für die Unterrichtspraxis". In: *Praxis der Naturwissenschaften–Physik in der Schule* 60.6, S. 42–49.

Nehring, Andreas und Martin Schwichow (2020). „Was ist Wissen, was ist Können? Deutungen des Kompetenzbegriffs und deren psychometrische Konsequenzen im Kontext von Fachwissen und Variablenkontrollstrategie". In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 26.1, S. 73–87.

Neumann, Irene (2011). *Beyond Physics Content Knowledge: Modeling Competence Regarding Nature of Scientific Inquiry and Nature of Scientific Knowledge*. Bd. v.117. Studien Zum Physik- und Chemielernen Ser. Berlin: Logos Verlag Berlin.

Neumann, Irene und Kerstin Kremer (2013). „Nature of Science und epistemologische Überzeugungen – Ähnlichkeiten und Unterschiede". In: *ZfDN* 19, S. 209–232.

Neumann, Knut (2004). *Didaktische Rekonstruktion eines physikalischen Praktikums für Physiker*. Bd. Bd. 38. Studien zum Physik- und Chemielernen. Berlin: Logos.

– (2013). „Mit welchem Auflösungsgrad können Kompetenzen modelliert werden? In welcher Beziehung stehen Modelle zueinander, die Kompetenz in einer Domäne mit unterschiedlichem Auflösungsgrad beschreiben?" In: *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft* 16.S1, S. 35–39.

Neuweg, Georg Hans (2002). „Lehrerhandeln und Lehrerbildung im Lichte des Konzepts des impliziten Wissens“. In: *Zeitschrift für Pädagogik* 48.1, S. 10–29.
– (2005). „Emergenzbedingungen pädagogischer Könnerschaft“. In: *Verwertbarkeit*. Hrsg. von Helmut Heid und Christian Harteis. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, S. 205–228. ISBN: 978-3-663-07737-4.
– (2011). „Das Wissen der Wissensvermittler“. In: *Handbuch der Forschung zum Lehrerberuf*. Hrsg. von Terhart, E., Bennewitz, H., Rothland, M. Münster: Waxmann, S. 451–477.
– (2015). *Das Schweigen der Könner: Gesammelte Schriften zum impliziten Wissen*. Münster und New York: Waxmann.
Nisbett, Richard E. und Timothy DeCamp Wilson (1977). „Telling more than we can know: Verbal Reports on Mental Processes“. In: *Psychological Review* 84.3, S. 231–259.
Nohl, Arnd-Michael (2013). *Relationale Typenbildung und Mehrebenenvergleich*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
Nott, Mick und Jerry Wellington (1996). „When the black box springs open: practical work in schools and the nature of science“. In: *International Journal of Science Education* 18.7, S. 807–818.
OECD (2016). *PISA 2015 Ergebnisse: Exzellenz und Chancengerechtigkeit in der Bildung*. PISA. Bielefeld: W. Bertelsmann Verlag.
Oser, Fritz, Tina Hascher und Maria Spychiger (1999). „Lernen aus Fehlern. Zur Psychologie des "negativen"Wissens“. In: *Fehlerwelten*. Hrsg. von Wolfgang Althof. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, S. 11–42.
Oser, Fritz und Jean-Luc Patry (1990). *Choreographien unterrichtlichen Lernens: Basismodelle des Unterrichts*. Bd. 89. Berichte zur Erziehungswissenschaft. Freiburg, Schweiz: Pädag. Inst. der Univ. Freiburg.
Pant, Hans Anand u. a. (2009). „Validity issues in standard-setting studies“. In: *Studies in Educational Evaluation* 35.2-3, S. 95–101.
Patel, Vimla L., José F. Arocha und David R. Kaufman (1998). „Expertise and Tacit Knowledge in Medicine“. In: *Tacit knowledge in professional practice*. Hrsg. von Sternberg, R.J. & Horvath, J.A. Hillsdale.
Peirce, Charles S. (1978). *[Harvard) lectures on pragmatism*. Bd. 5. Collected Papers of C. S. Peirce. Cambridge: Belknap, Harvard.
Pickering, A. (1989). „Living in the material world: On realism and experimental practice“. In: *The uses of experiment*. Hrsg. von David Gooding. Cambridge: Cambridge Univ. Press, S. 275–298.
– (1992). „From Science as Knowledge to Science as Practice“. In: *Science as practice and culture*. Hrsg. von Andrew Pickering. Chicago: Univ. of Chicago Press, S. 1–28.
Popper, Karl (1935). *Logik der Forschung: Zur Erkenntnistheorie der modernen Naturwissenschaft*. Bd. 9. Schriften zur wissenschaftlichen Weltauffassung. Wien: Springer-Verlag Wien GmbH.

Qualitäts- und UnterstützungsAgentur - Landesinstitut für Schule (2022). *Handbuch zu 25 Schlüsselexperimenten im Grundkurs Physik*. https://www. schulentwicklung.nrw.de/ lehrplaene/ lehrplannavigator.
Ralle, Bernd und David-Samuel Di Fuccia (2014). „Aktionsforschung als Teil fachdidaktischer Entwicklungsforschung". In: *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*. Hrsg. von Dirk Krüger, Ilka Parchmann und Horst Schecker. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 43–55.
Rehfeldt, Daniel (2017). *Erfassung der Lehrqualität naturwissenschaftlicher Experimentalpraktika*. Bd. Band 246. Studien zum Physik- und Chemielernen. Berlin: Logos Verlag.
Reichenbach, Hans (1938). *Experience and prediction: An analysis of the foundations and the structure of knowledge*. Chicago: University of Chicago Press.
Reichertz, Jo (2016). *Qualitative und interpretative Sozialforschung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
Reimann, Peter (1997). *Lernprozesse beim Wissenserwerb aus Beispielen: Analyse, Modellierung, Förderung: Zugl.: Freiburg (Breisgau), Univ., Habil.-Schr*. 1. Aufl. Aus dem Programm Huber. Bern: Huber.
– (1998). „Novizen- und Expertenwissen". In: *Wissen.* Hrsg. von F. Klix und H. Spada. Enzyklopädie der Psychologie.Themenbereich C. Serie II. Göttingen: Hogrefe, S. 335–365.
Reinhold, Peter (1996). *Offenes Experimentieren und Physiklernen: Zugl.: Kiel, Univ., Habil.-Schr.*, Bd. 149. IPN. Kiel.
– (2004). „Naturwissenschaftsdidaktische Forschung in der Lehrerbildung". In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 10, S. 117–145.
Reinhold, Peter, Gunter Lind und Gunnar Friege (1999). „Wissenszentriertes Problemlösen in Physik". In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaft* 5.1, S. 41–62.
Rheinberger, Hans-Jörg und Michael Hagner, Hrsg. (1995). *Experimentalisierung des Lebens*. Berlin, Boston: De Gruyter.
Rieber, Robert W., Hrsg. (1998). *The Collected Works of L. S. Vygotsky: Child Psychology*. Springer eBook Collection. Boston, MA: Springer.
Rieß, Falk (2000). „History of Physics in Science Teacher Training in Oldenburg". In: *Science & Education* 9.4, S. 399–402.
Riewerts, Kerrin (2016). „Schreiben und Naturwissenschaften in der Hochschule. Unvereinbare Gegensätze oder fruchtbare Zusammenarbeit?" In: *Wissenschaftliches Schreiben in Natur- und Technikwissenschaften*. Hrsg. von Andreas Hirsch-Weber und Stefan Scherer. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 109–120.
Rosenberg, Florian von (2012). „Rekonstruktion biographischer (Bildungs-)Prozesse: Überlegungen zu einer prozessanalytischen Typenbildung". In: *Qualitative Bildungsforschung und Bildungstheorie*. Hrsg. von Ingrid Miethe und Hans-Rüdiger Müller. Opladen: Budrich, S. 193–207.
Ruickoldt, G. (1996). „Ergebnisse einer Umfrage zum Physikalischen Praktikum". In: *Physikalische Blätter* 52.10, S. 1022–1024.

Ruiz-Primo, Maria Araceli und Richard J. Shavelson (1996). „Rhetoric and Reality in Science Performance Assessments: An Update". In: *Journal of Research in Science Teaching* 33.10, S. 1045–1063.

Sacher, Marc D. und Anna B. Bauer (2021). „Kompetenzförderung im Laborpraktikum". In: *Labore in der Hochschullehre*. Hrsg. von C. Terkowsky u. a. Hochschule und Wissenschaft. Bielefeld: wbv Media, S. 51–66.

Sacher, Marc D., Heike M. Probst u. a. (2015). „Entwicklung eines kompetenzorientierten physikalischen Laborpraktikums". In: *Leitkonzepte der Hochschuldidaktik*. Hrsg. von Stefanie Hartz und Sabine Marx. Reihe Blickpunkt Hochschuldidaktik. Gütersloh: Bertelsmann Verlag, S. 128–136.

Sander, Florian (2000). *Verbindung von Theorie und Experiment im physikalischen Praktikum: Eine empirische Untersuchung zum handlungsbezogenen Vorverständnis und dem Einsatz grafikorientierter Modellbildung im Praktikum: Univ., Diss.–Bremen, 1999*. Bd. 13. Studien zum Physiklernen. Berlin: Logos.

Sander, Hannes (2017). „Orientierungen von Jugendlichen beim Urteilen und Entscheiden in Kontexten nachhaltiger Entwicklung". Dissertation. Universität Hamburg and Logos Verlag Berlin GmbH.

Saniter, Andreas (2003). *Spezifika der Verhaltensmuster fortgeschrittener Studierender der Physik: Eine empirische Laborstudie zur Analyse der Bedeutungsentwicklungsprozesse in den Dimensionen Zeit, Inhalt und Komplexität unter besonderer Berücksichtigung zugeschriebener Strategien: Univ., Diss.–Bremen, 2003*. Bd. 28. Studien zum Physiklernen. Berlin: Logos-Verl. ISBN: 3832502920.

Schaper, Niclas (2009). „Aufgabenfelder und Perspektiven bei der Kompetenzmodellierung und -messung in der Lehrerbildung". In: *Lehrerbildung auf dem Prüfstand* 2, S. 166–199.

Schaper, Niclas u. a. (2012). *Fachgutachten zur Kompetenzorientierung in Studium und Lehre: HRK Fachgutachten; Projekt nexus: Übergänge gestalten, Studienerfolg verbessern*. www.hrk- nexus.de/.

Schauble, Leona (1990). „Belief revision in children: The role of prior knowledge and strategies for generating evidence". In: *Journal of Experimental Child Psychology* 49.1, S. 31–57.

Schauble, Leona, Leopold E. Klopfer und Kalyani Raghavan (1991). „Students' transition from an engineering model to a science model of experimentation". In: *Journal of Research in Science Teaching* 28.9, S. 859–882.

Schecker, Horst, Hans E. Fischer und Hartmut Wiesner (2004). „Physikunterricht in der gymnasialen Oberstufe". In: *Kerncurriculum Oberstufe II – Biologie, Chemie, Physik, Geschichte, Politik*. Hrsg. von H.-E. Tenorth. Weinheim: Beltz-Verlag, S. 148–234.

Schecker, Horst, Knut Neumann u. a. (2016). „Stufen experimenteller Kompetenz". In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 22.1, S. 197–213.

Schecker, Horst und Ilka Parchmann (2006). „Modellierung naturwissenschaftlicher Kompetenz". In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 12, S. 45–66.

Schenk, Wolfgang u. a., Hrsg. (2014). *Physikalisches Praktikum*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
Schlattmann, Marco (2004). *Methoden und Werkzeuge zur Entwicklung virtueller multimedialer Labore: Zugl.: Oldenburg, Univ., Diss., 2004*. Bd. 1025. Dissertation.de. Berlin: dissertation.de - Verl. im Internet.
Schmidt, H. G., G. R. Norman und H. Boshuizen (1990). „A cognitive perspective on medical expertise: theory and implications". In: *Academic Medicine* 65.10, S. 611–621.
Schnotz, Wolfgang (1994). *Aufbau von Wissensstrukturen: Untersuchungen zur Kohärenzbildung beim Wissenserwerb mit Texten: Zugl.: Tübingen, Univ., Habil.-Schr., 1993*. Bd. 20. Fortschritte der psychologischen Forschung. Weinheim: Beltz Psychologie-Verl.-Union.
Schön, Donald (1983). *The reflective practitioner: How professionals think in action*. New York: Basic Books.
Schreiber, Nico (2009). „Experimentelle Kompetenz messen?!" In: *Physik und Didaktik in Schule und Hochschule* 3/8, S. 92–101.
– (2012). *Diagnostik experimenteller Kompetenz: Validierung technologiegestützter Testverfahren im Rahmen eines Kompetenzstrukturmodells*. Bd. 139. Studien zum Physik- und Chemielernen. Berlin: Logos.
Schreiber, Nico, Heike Theyßen und Horst Schecker (2014). „Diagnostik experimenteller Kompetenz: Kann man Realexperimente durch Simulationen ersetzen?" In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 20.1, S. 161–173.
Schumacher, Dieter (2007). „Student undergraduate laboratory and project work". In: *European Journal of Physics* 28.3.
Schvaneveldt, Roger W. u. a. (1985). „Measuring the structure of expertise". In: *International Journal of Man-Machine Studies* 23.6, S. 699–728.
Schwichow, Martin und Andreas Nehring (2018). „Variablenkontrolle beim Experimentieren in Biologie, Chemie und Physik: Höhere Kompetenzausprägungen bei der Anwendung der Variablenkontrollstrategie durch höheres Fachwissen? Empirische Belege aus zwei Studien". In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 24.1, S. 217–233.
Séré, Marie-Geneviève (2002). „Towards renewed research questions from the outcomes of the European project Labwork in Science Education". In: *Science Education* 86.5, S. 624–644.
Shavelson, Richard J. (1974). „Methods for examing representations of a subject-matter structure in a student's memory". In: *Journal of Research in Science Teaching* 11.3, S. 231–249.
Shavelson, Richard J. und Gail Baxter (1991). „Performance Assessment in Science". In: *Applied Measurement in Education* 4.4, S. 347–362.
Shavelson, Richard J., Gail Baxter und Xiaohong Gao (1993). „Sampling Variability of Performance Assessments". In: *Journal of Educational Measurement* 30.3, S. 215–232.

Shavelson, Richard J., Guillermo Solano-Flores und Maria Araceli Ruiz-Primo (1998). „Toward a science performance assessment technology". In: *Evaluation and Programm Planning* 21, S. 171–184.

Shulman, L. S. (1986). „Those Who Understand: Knowledge Growth in Teaching". In: *Educational Researcher* 15.2, S. 4–14.

Simon, D. und H. Simon (1978). „Individual differences in solving physics problems". In: *Children's thinking: Whats develops?* Hrsg. von R. S. Siegler. Hillsdale, New York: Lawrence Erlbaum Associates, S. 215–231.

Smith, Eliot R. und Frederick D. Miller (1978). „Theoretical Note: Limits on Perception of Cognitive Processes: A Reply to Nisbett and Wilson". In: *Psychological Review* 85.4, S. 355–362.

Sollaci, L. B. und M. G. Pereira (2004). „The introduction, methods, results, and discussion (IMRAD) structure: a fifty-year survey". In: *J Med Libr Assoc.* 92.3, S. 364–367.

Sorge, Stefan, Stefan Petersen und Knut Neumann (2016). „Die Bedeutung der Studierfähigkeit für den Studienerfolg im 1. Semester in Physik". In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 22.1, S. 165–180.

Stampfer, Christoph, Heidrun Heinke und Sebastian Staacks (2020). „A lab in the pocket". In: *Nature Reviews Materials* 5.3, S. 169–170.

Steinke, Ines (1999). *Kriterien qualitativer Forschung: Ansätze zur Bewertung qualitativ-empirischer Sozialforschung*. Weinheim und München: Juventa Verlag.

Sternberg, Robert J. (1995). „Expertise in Complex Problem Solving". In: *Complex Problem Solving*. Hrsg. von P. A. Frensch und Joachim Funke. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum, S. 298–322.

Straube, Philipp (2016). *Modellierung und Erfassung von Kompetenzen naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung bei (Lehramts-) Studierenden im Fach Physik*. Bd. 209. Studien zum Physik- und Chemielernen. Berlin: Logos.

Strübing, Jörg (2014). *Grounded theory: Zur sozialtheoretischen und epistemologischen Fundierung eines pragmatistischen Forschungsstils*. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Lehrbuch. Wiesbaden: Springer VS.

Teichmann, E., H. J. Lewandowski und M. Alemani (2022). „Investigating students' views of experimental physics in German laboratory classes". In: *Physical Review Physics Education Research* 18.1.

Teichrew, Albert und Roger Erb (2018). „Implementierung modellbildender Lernangebote in das physikalische Praktikum". In: *PhyDid B - Didaktik der Physik-Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung Würzburg*, S. 269–275.

Tepner, Oliver u. a. (2012). „Modell zur Entwicklung von Testitems zur Erfassung des Professionswissens von Lehrkräften in den Naturwissenschaften". In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaft* 18, S. 7–28.

Tesch, Maike und Reinders Duit (2004). „Experimentieren im Physikunterricht: Ergebnisse einer Videostudie". In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 10, S. 51–69.

Tetens, Holm (1987). *Experimentelle Erfahrung: Eine wissenschaftstheoretische Studie über die Rolle des Experiments in der Begriffs- und Theoriebildung der Physik: Teilw. zugl.: Marburg, Univ., Habil.-Schr., 1986*. Bd. 8. Paradeigmata. Hamburg: Meiner.

Theyßen, Heike (1999). *Ein Physikpraktikum für Studierende der Medizin: Darstellung der Entwicklung und Evaluation eines adressatenspezifischen Praktikums nach dem Modell der Didaktischen Rekonstruktion*. Bd. 9. Studien zum Physik- und Chemielernen. Berlin: Logos.

Theyßen, Heike, Horst Schecker, Christoph Gut u. a. (2014). „Modelling and Assessing Experimental Competencies in Physics". In: *Topics and Trends in Current Science Education*. Hrsg. von Catherine Bruguière, Pierre Clément und Andrée Tiberghien. Dordrecht: Springer Netherlands, S. 321–337.

Theyßen, Heike, Horst Schecker, Knut Neumann u. a. (2016). „Messung experimenteller Kompetenz: ein computergestützter Experimentiertest". In: *PhyDid A - Physik und Didaktik in Schule und Hochschule* 1/15, S. 26–48.

Theyßen, Heike, Sarah Struzyna u. a. (2016). „Online Physics Lab Exercises—a Binational Study on the Transfer of Teaching Resources". In: *International Journal of Science and Mathematics Education* 14.5, S. 865–883.

Tobin, Kenneth (1990). „Research on Science Laboratory Activities: In Pursuit of Better Questions and Answers to Improve Learning". In: *School science and Mathematics* 90.5, S. 403–418.

Toothacker, W. S. (1983). „A critical look at introductory laboratory instruction". In: *American Journal of Physics* 51.6, S. 516.

Trapmann, Sabrina u. a. (2007). „Die Validität von Schulnoten zur Vorhersage des Studienerfolgs - eine Metaanalyse 1Dieser Beitrag entstand im Kontext des Projekts "Eignungsdiagnostische Auswahl von Studierenden", das im Rahmen des Aktionsprogramms "StudierendenAuswahl" des Stifterverbands für die Deutsche Wissenschaft und der Landesstiftung Baden-Württemberg durchgeführt wird". In: *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie* 21.1, S. 11–27.

Uebel, Thomas E. (1996). „Anti-Foundationalism and the Vienna Circle's Revolution in Philosophy". In: *The British Journal for the Philosophy of Science* 47.3, S. 415–440.

Universität Münster, Prof. Dr. Stefan Heusler (2021). *App: GUM-Rechner*. www.physik kommunizieren.de.

Upmeier zu Belzen, Annette und Dirk Krüger (2019). „Modelle und Modellieren im Biologieunterricht: Ein Fall für Erkenntnisgewinnung". In: *Unterricht Chemie* 171, S. 38–41.

Vogelsang, Christoph (2014). *Validierung eines Instruments zur Erfassung der professionellen Handlungskompetenz von (angehenden) Physiklehrkräften: Zusammenhangsanalysen zwischen Lehrerkompetenz und Lehrerperformanz*. Bd. 174. Studien zum Physik- und Chemielernen. Berlin: Logos.

Vogelsang, Christoph und David Woitkowski (2017). „Physikdidaktische Forschung in der Hochschule: Eine Übersicht über Forschungsdesigns und -methoden". In: *die hochschullehre* 3, online unter www.hochschullehre.org.

Vorholzer, Andreas und Claudia von Aufschnaiter (2020). „Dimensionen und Ausprägungen fachinhaltlicher Kompetenz in den Naturwissenschaften – ein Systematisierungsversuch“. In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*.

Walpuski, Maik u. a. (2010). „ESNaS-Evaluation der Standards für die Naturwissenschaften in der Sekundarstufe I“. In: *Bildungsstandards und Kompetenzmodelle: Beiträge zu einer aktuellen Diskussion über Schule, Lehrerbildung und Unterricht*. Hrsg. von Axel Gehrmann. Bad Heilbrunn: Klinkhardt, S. 171–184.

Webb, Noreen M., Richard J. Shavelson und Jeffrey T. Steedle (2018). „Generalizability Theory in Assessment Contexts“. In: *Handbook on measurement, assessment, and evaluation in higher education*. Hrsg. von Charles Secolsky und D. Brian Denison. New York, NY und London: Routledge Taylor & Francis Group, S. 201–216.

Weinert, F. E., Hrsg. (2001a). *Leistungsmessung in Schulen*. Weinheim: Beltz.

– (2001b). „Vergleichende Leistungsmessung in Schulen - Eine umstrittene Selbstverständlichkeit“. In: *Leistungsmessung in Schulen*. Hrsg. von F. E. Weinert. Weinheim: Beltz, S. 17–32.

Wellnitz, Nicole, Hans E. Fischer u. a. (2012). „Evaluation der Bildungsstandards – eine fächerübergreifendeTestkonzeption für den Kompetenzbereich Erkenntnisgewinnung“. In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaft* 18, S. 261–292.

Wellnitz, Nicole, Martin Hecht u. a. (2017). „Modellierung des Kompetenzteilbereichs naturwissenschaftliche Untersuchungen“. In: *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft* 88.3, S. 397.

Welzel, Manuela und Kerstin Haller (1998). „Ziele, die Lehrende mit dem Experimentieren in der naturwissenschaftlichen Ausbildung verbinden: Ergebnisse einer europäischen Umfrage“. In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaft* 4.1, S. 29–44.

Westphal, Wilhelm (1938). *Physikalisches Praktikum*. Vieweg.

Wieman, Carl E. und Natasha G. Holmes (2015). „Measuring the impact of an instructional laboratory on the learning of introductory physics“. In: *American Journal of Physics* 83.11, S. 972–978.

Wilcox, Bethany R. und H. J. Lewandowski (2016). „Open-ended versus guided laboratory activities:Impact on students' beliefs about experimental physics“. In: *Physical Review Physics Education Research* 12.2.

Winther, Esther (2007). „Performanz messen - Kompetenz diagnostizieren“. In: *Professionell lehren, erfolgreich lernen*. Hrsg. von Doris Lemmermöhle u. a. Münster: Waxmann, S. 303–316.

Woitkowski, David (2015). *Fachliches Wissen Physik in der Hochschulausbildung: Konzeptualisierung, Messung, Niveaubildung: Univ., Diss.–Paderborn, 2015*. Bd. 185. Studien zum Physik- und Chemielernen. Berlin: Logos-Verl.

– (2018). „Fachwissen und Problemlösen im Physikstudium: Vorstellung des Forschungsprojektes KEMϕ“. In: *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung Würzburg*, S. 125–131.

– (2020). „Tracing physics content knowledge gains using content complexity levels“. In: *International Journal of Science Education* 42.10, S. 1585–1608.
Woolnough, Brain und Terry Allsop (1985). *Practical work in science*. Cambridge science education series. Cambridge: Cambridge University Press.
Zimmerman, Corinne (2007). „The development of scientific thinking skills in elementary and middle school“. In: *Developmental Review* 27.2, S. 172–223.
Zlatkin-Troitschanskaia, Olga (2021). „Advances and perspectives of competence research in higher education – Report on the German KoKoHs program“. In: *International Journal of Chinese Education* 10.1.
Zlatkin-Troitschanskaia, Olga, Hans Anand Pant u. a. (2016). *Messung akademisch vermittelter Kompetenzen von Studierenden und Hochschulabsolventen: Ein Überblick zum nationalen und internationalen Forschungsstand*. Bd. v.1. Edition ZfE Ser. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
Zlatkin-Troitschanskaia, Olga und Jana Seidel (2011). „Kompetenz und ihre Erfassung – das neue „Theorie-Empirie-Problem“ der empirischen Bildungsforschung?“ In: *Stationen empirischer Bildungsforschung: Traditionslinien und Perspektiven ; [Klaus Beck zum 70. Geburtstag gewidmet]*. Hrsg. von Olga Zlatkin-Troitschanskaia. Wiesbaden: VS Verl. für Sozialwiss, S. 218–233.
Zwickl, Benjamin M. und Noah Finkelstein (2013). „The process of transforming an advanced lab course: Goals, curriculum and assessment“. In: *American Journal of Physics* 81, S. 63–70.
Zwickl, Benjamin M., Dehui Hu u. a. (2015). „Model-based reasoning in the physics laboratory: Framework and initial results“. In: *Physical Review Special Topics - Physics Education Research* 11.2.

A. Anhang

Im Anhang sind die Dokumente und Informationen enthalten, auf die im vorherigen Text verwiesen wurden. Aufgrund des Umfanges konnten nicht alle Daten eingefügt werden. Bei Interesse wenden Sie sich bitte an die Autorin.

A.1. Qualitative Inhaltsanalyse Versuchsanleitungen - Liste Universitäten

1. RWTH Aachen
2. HU Berlin
3. TU Dresden
4. Universität Duisburg-Essen
5. FAU Erlangen-Nürnberg
6. Universität Gießen
7. Universität Göttingen
8. TU München
9. Universität Paderborn
10. Universität Regensburg

A.2. Konstruierte experimentelle Aufgabenstellungen

A.2.1. Aufgabenstellung 1 - weniger komplex

Aufgabe:

Planen und Führen Sie ein geeignetes Experiment durch, das folgende Fragestellung beantwortet:

Welcher Messaufbau eignet sich für eine möglichst präzise Bestimmung (5 signifikante Stellen) zweier unterschiedlicher elektrischer Widerstände mittels der Aufnahme von Strom-Spannungskennlinien?

Hinweise:

- Die nachfolgenden Teilaufgaben stellen keine chronologische Abfolge dar. Sie sind frei in der Wahl der Abfolge der einzelnen Schritte.
- Wählen Sie aus jedem Kästchen nur einen (!) Widerstand aus.
- Führen Sie ein Laborbuch während des gesamten Experiments und halten Sie dort auch die Begründungen fest zu denen Sie aufgefordert werden. Das Laborbuch darf in aussagekräftigen Stichpunkten geführt werden! Nummerieren Sie bitte die Seiten.
- Lassen Sie am Ende des Experimentes alles Komponenten angeschaltet und alle Fenster des Laptops geöffnet.

Planung

1. Nennen Sie die notwendigen physikalischen Grundlagen für die Planung der Messaufbauten und begründen Sie welcher mathematische Zusammenhang für die Durchführung des Experiments relevant ist.
2. Skizzieren Sie die Messaufbauten in Form von Schaltplänen und begründen Sie diese.
3. Wählen Sie die Messgeräte und Materialien aus und begründen Sie ihre Wahl.
4. Erstellen Sie einen geeigneten Messplan und begründen Sie diesen.

Aufbau und Testen

1. Bauen Sie einen der geplanten Messaufbauten unter Berücksichtigung der Laborsicherheit auf.
2. Bestimmen Sie die charakteristischen Eigenschaften der gewählten Messgeräte und Materialien.
3. Überprüfen Sie die Funktionalität des Aufbaus.
4. Nennen Sie mögliche Fehlerquellen und wie diese minimiert oder kontrolliert werden können.
5. Halten Sie ggf. Änderungen im Vergleich zum geplanten Aufbau fest.

Durchführung

1. Führen Sie die Aufnahme der Messwerte durch.
2. Stellen Sie die aufgenommenen Messwerte in geeigneter Form dar.
3. Notieren Sie sich alle versuchsrelevante Beobachtungen.

Auswertung

1. Wählen Sie eine geeignete Auswertungsmethode und begründen Sie diese.
2. Führen Sie eine Fehlerrechnung durch und begründen Sie diese.
3. Beantworten Sie begründet die Fragestellung des Experiments.
4. Beurteilen Sie begründet die Güte des Experiments.
5. Schlagen Sie Optimierungen des Experimentes vor.
6. Begründen Sie die Optimierungen.

A.2.2. Aufgabenstellung 2 - komplexer

Aufgabe:

Planen und Führen Sie ein geeignetes Experiment durch, das folgende Fragestellung beantwortet:

In welchem Frequenzbereich verhält sich der induktive Widerstand einer Spule in einem Wechselstromkreis näherungsweise wie ein Ohm'scher Widerstand?

Nehmen Sie für die Beantwortung der Fragestellung geeignete Spannungsabfälle an den Bauteilen auf, stellen Sie grafisch das Quadrat des Scheinwiderstands $|Z|^2$ als Funktion des Frequenzquadrates f^2 dar und bestimmen Sie mit Hilfe einer geeigneten Fitfunktion den Scheinwiderstand und die Induktivität der unbekannten Spule mit einer Genauigkeit von 5 signifikanten Stellen. Variieren Sie am Funktionsgenerator geeignet die Ausgabespannung und wiederholen Sie die Messung.

Bleiben Sie bei Ihrer Untersuchung aufgrund der Limitierungen der Messgeräte in einem Messbereich unter 200 Hz.

Planung

1. Nennen Sie die notwendigen physikalischen Grundlagen für die Planung des Messaufbaus und begründen Sie welcher mathematische Zusammenhang für die Durchführung des Experiments relevant ist.
2. Skizzieren Sie den Messaufbau in Form von Schaltplänen und begründen Sie diesen.
3. Wählen Sie die Messgeräte und Materialien aus und begründen Sie ihre Wahl.
4. Erstellen Sie einen geeigneten Messplan und begründen Sie diesen.

Aufbau und Testen

1. Bauen Sie den geplanten Messaufbau unter Berücksichtigung der Laborsicherheit auf.
2. Bestimmen Sie die charakteristischen Eigenschaften der gewählten Messgeräte und Materialien.
3. Überprüfen Sie die Funktionalität des Aufbaus.
4. Nennen Sie mögliche Fehlerquellen und wie diese minimiert oder kontrolliert werden können.
5. Halten Sie ggf. Änderungen im Vergleich zum geplanten Aufbau fest.

Durchführung

1. Führen Sie die Aufnahme der Messwerte durch.
2. Stellen Sie die aufgenommenen Messwerte in geeigneter Form dar.
3. Notieren Sie sich alle versuchsrelevante Beobachtungen.

Auswertung

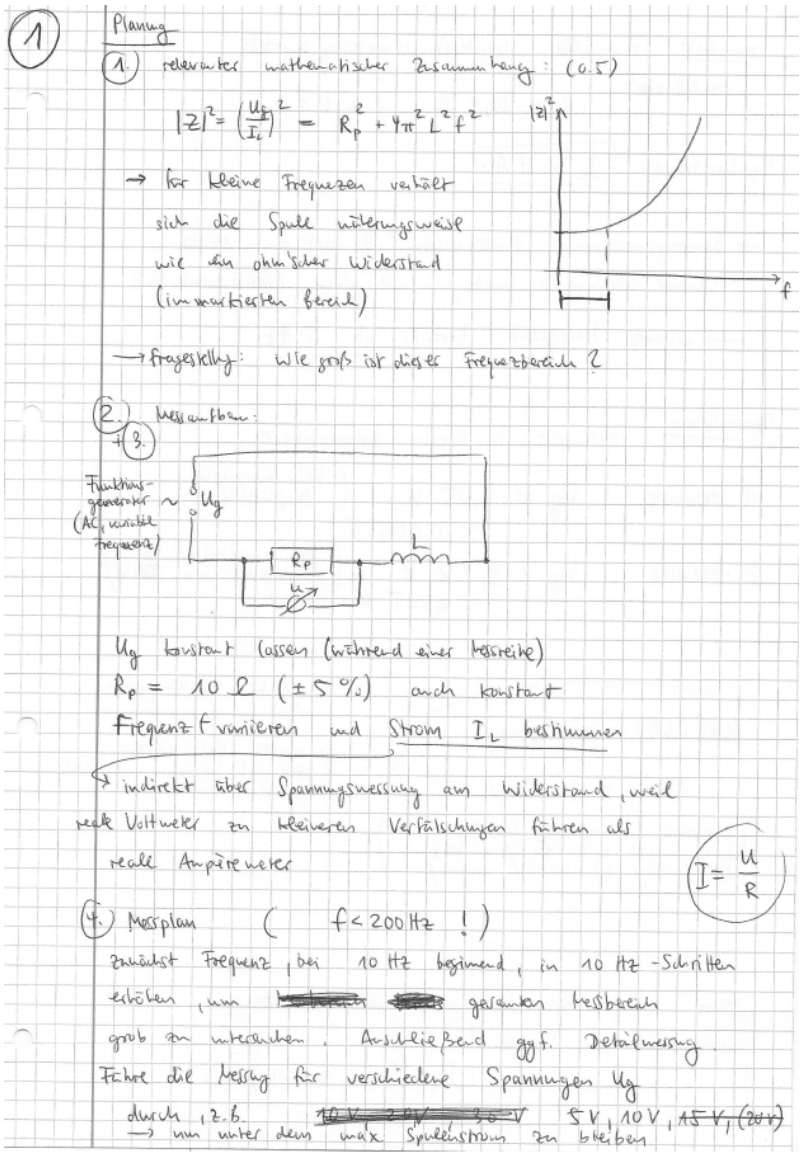
1. Wählen Sie eine geeignete Auswertungsmethode und begründen Sie diese.
2. Führen Sie eine Fehlerrechnung durch und begründen Sie diese.
3. Beantworten Sie begründet die Fragestellung des Experiments.
4. Beurteilen Sie begründet die Güte des Experiments.
5. Schlagen Sie Optimierungen des Experimentes vor.
6. Begründen Sie die Optimierungen.

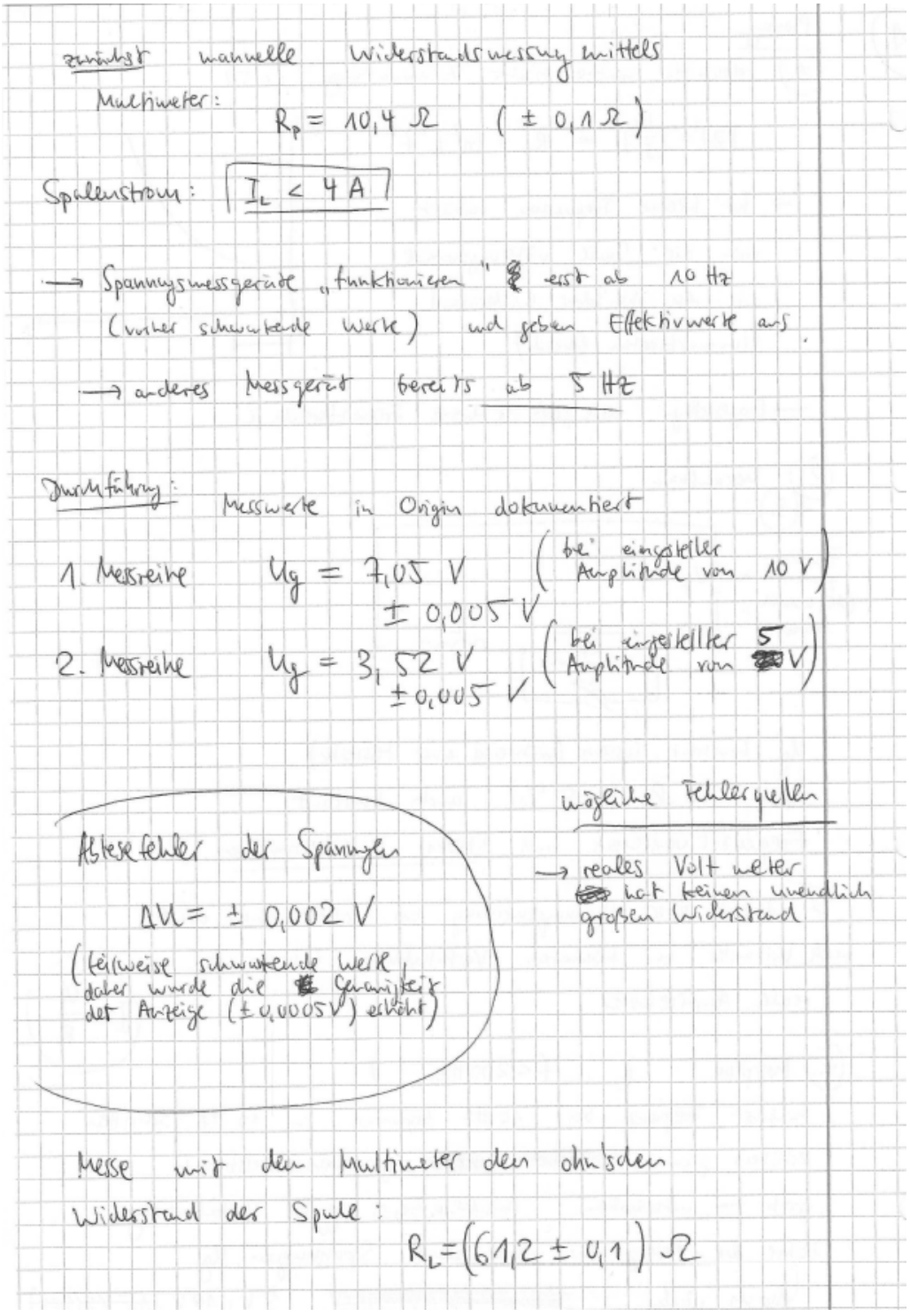
A.3. Beispielhafte Illustration der erhobenen Daten

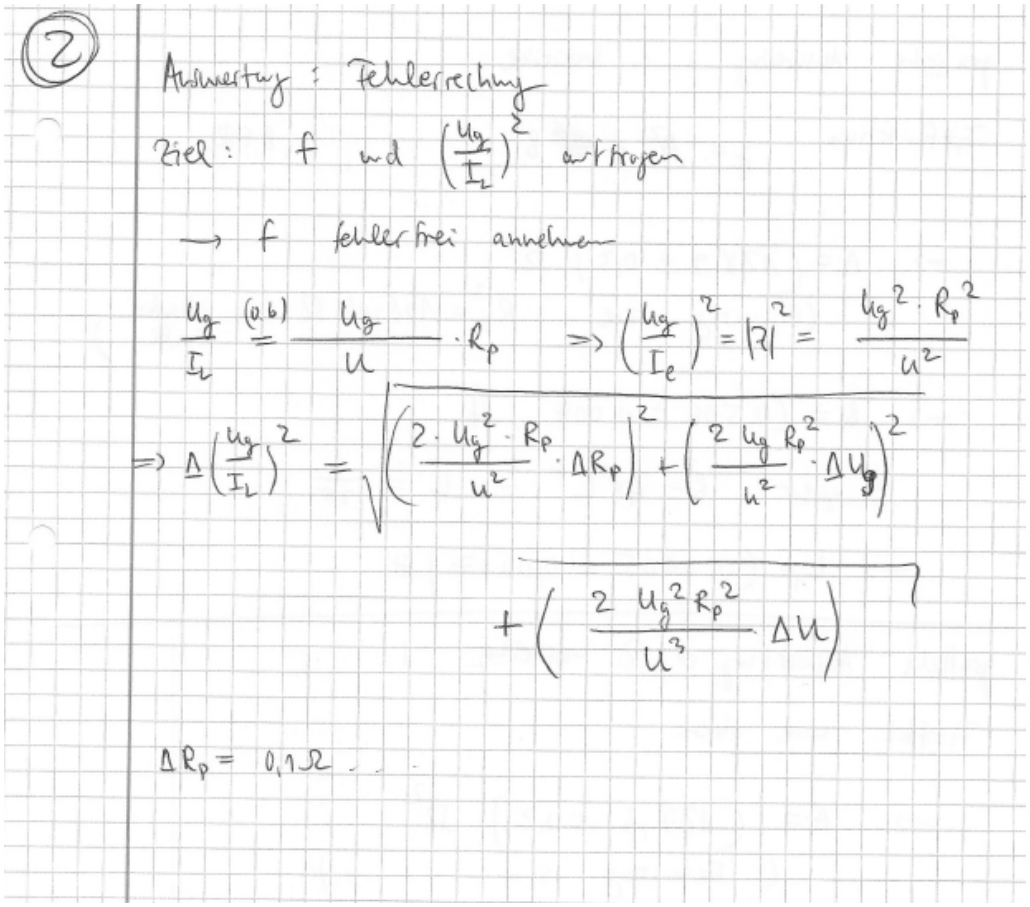
Im Folgenden wird anhand zweier ausgewählter Fälle (**Irmgard** und **Helmut**) illustriert, welche Daten erhoben wurden.

A.3.1. Beispielmaterialien - Irmgard, die Expertin bei der Aufgabe 2

A.3.1.1. Irmgard - Laborjournal




zunächst manuelle Widerstandsmessung mittels
Multimeter:
$R_p = 10{,}4\ \Omega$ $(\pm 0{,}1\ \Omega)$
Spulenstrom: $I_L < 4\ A$
→ Spannungsmessgeräte „funktionieren" erst ab 10 Hz
(unter schwankende Werte) und geben Effektivwerte aus.
→ anderes Messgerät bereits ab 5 Hz
Durchführung: Messwerte in Origin dokumentiert
1. Messreihe $U_g = 7{,}05\ V \pm 0{,}005\ V$ (bei eingestellter Amplitude von 10 V)
2. Messreihe $U_g = 3{,}52\ V \pm 0{,}005\ V$ (bei eingestellter 5 Amplitude von V)
Ablesefehler der Spannung
$\Delta U = \pm 0{,}002\ V$
(teilweise schwankende Werte, daher wurde die Genauigkeit der Anzeige ($\pm 0{,}0005$ V) erhöht)
mögliche Fehlerquellen
→ reales Voltmeter hat keinen unendlich großen Widerstand
Messe mit dem Multimeter den ohm'schen Widerstand der Spule:
$R_L = (6{,}12 \pm 0{,}1)\ \Omega$



(2)

Auswertung: Fehlerrechnung

Ziel: f und $\left(\frac{U_g}{I_L}\right)^2$ auftragen

→ f fehlerfrei annehmen

$$\frac{U_g}{I_L} \overset{(0.6)}{=} \frac{U_g}{U} \cdot R_p \quad \Rightarrow \left(\frac{U_g}{I_e}\right)^2 = |Z|^2 = \frac{U_g^2 \cdot R_p^2}{U^2}$$

$$\Rightarrow \Delta\left(\frac{U_g}{I_L}\right)^2 = \sqrt{\left(\frac{2 \cdot U_g^2 \cdot R_p}{U^2} \cdot \Delta R_p\right)^2 + \left(\frac{2 U_g R_p^2}{U^2} \cdot \Delta U_g\right)^2 + \left(\frac{2 U_g^2 R_p^2}{U^3} \Delta U\right)}$$

$\Delta R_p = 0{,}1\,\Omega$

grafische Auswertung d. 1. Messreihe:

Fitfunktion $y = A^2 + B^2 \cdot x^2$, $A, B \in \mathbb{R}$

$\Rightarrow A = (128{,}9 \pm 0{,}3)\ \Omega^2$

(Erwartung wäre $R_p^2 = 108{,}16\ \Omega$ bei idealer Spule)

$\Rightarrow B = (0{,}506 \pm 0{,}004)\ H$

Es gilt $B^2 = 4\pi^2 L^2 \rightarrow L = \frac{B}{2\pi}$

$\Rightarrow L_1 = (0{,}0805 \pm 0{,}0007)\ H$

---

grafische Auswertung d. 2. Messreihe

Fitfkt. wie oben

$\Rightarrow A = (127{,}3 \pm 0{,}2)\ \Omega^2$

(Erwartung s.o. ...)

$\Rightarrow B = (0{,}501 \pm 0{,}003)\ H$

wieder gilt $L = \frac{B}{2\pi}$

$\Rightarrow L_2 = (0{,}0797 \pm 0{,}0005)\ H$

→ Mittelung der Werte (und Abschätzung des Fehlers, sodass die Fehlerbereiche der Teilergebnisse $(L_i - \Delta L_i, L_i + \Delta L_i)$ im Fehlerbereich des Ergebnisses liegen

$\Rightarrow L = (0{,}0808 \pm 0{,}0011)\ Hz$

$L = (80 \pm 1)\ mH$

(3) § weiter: Auswertung

Die Spule kann schließlich als Reihenschaltung aus einer idealen Spule und einem ohmschen Widerstand (mit Betrag $R_L = 61{,}2\ \Omega$) angesehen werden.

Für den Scheinwiderstand folgt

$$|Z| = |R_L + iL\omega| = \sqrt{R_L^2 + (\omega L)^2}$$

$$= \sqrt{R_L^2 + 4\pi^2 f^2 L^2}$$

Für kleine Frequenzen verhält sich die Spule näherungsweise wie ein Ohm'scher Widerstand; d.h.

$|Z| \approx R_L$ sonst gilt: $|Z| \gg R_L$

Ich definiere „näherungsweise" so, dass gilt

$Z_{f_0} \leq 1{,}1 \cdot R_L$, d.h. die Abweichung vom Ohm'schen Fall beträgt höchstens 10 %.

Damit ergibt sich folgende Rechnung: für die max. Frequenz f_0

$$Z_{f_0} = \sqrt{R_L^2 + 4\pi^2 f_0^2 L^2} = 1{,}1 \cdot R_L$$

$$\Rightarrow \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi f_0 L}{R_L}\right)^2} = 1{,}1$$

$$\Rightarrow 1 + \left(\frac{2\pi f_0 L}{R_L}\right)^2 = 1{,}21$$

$$\Rightarrow \frac{2\pi f_0 L}{R_L} = \sqrt{0{,}21} \Rightarrow f_0 = \frac{R_L}{2\pi L}\sqrt{0{,}21}$$

Mit den Messwerten ergibt sich:

$$f_0 = \frac{R_L}{2\pi L} \cdot \sqrt{0{,}21} = \frac{61{,}2\,\Omega}{2\pi \cdot 0{,}08\,H} \cdot \sqrt{0{,}21} \approx 56\,Hz$$

Da das Wort „näherungsweise" sehr weit ausgelegt werden kann, ist dies nur eine grobe Abschätzung, weshalb es nicht wirklich sinnvoll ist, für diese Frequenz einen Fehler zu berechnen.

→ Endergebnis

Für Frequenzen bis 56 Hz verhält sich die ~~der~~ induktive Widerstand der gegebenen Spule näherungsweise wie ein ohm'scher Widerstand, d.h. der Scheinwiderstand weicht um max. 10 % von einem entsprechenden ohm'schen Widerstand ab.

Optimierungen:

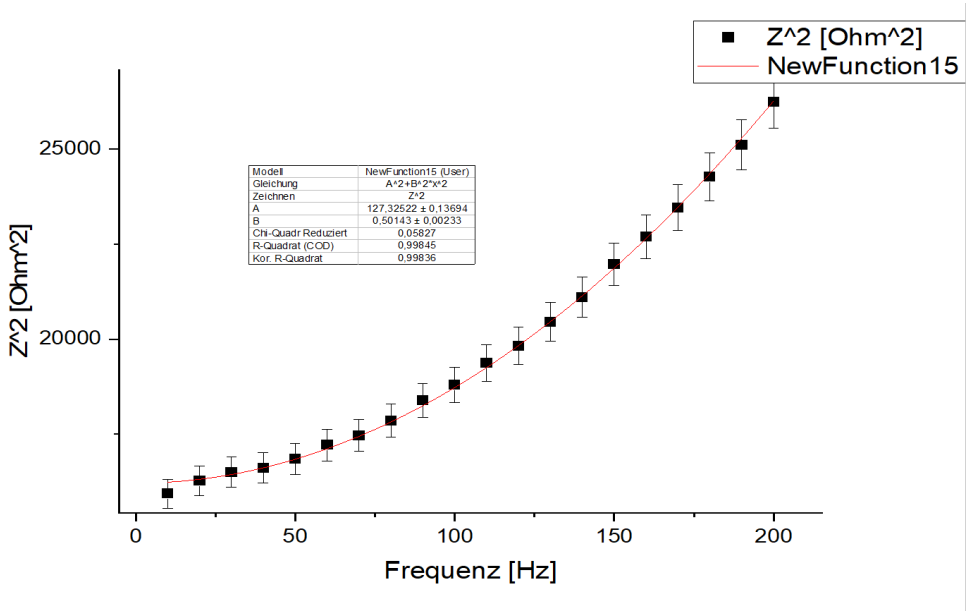
→ Vergrößerung des möglichen & messbaren Frequenzbereichs (mit meinen Messinstrumenten könnten Frequenzen < 10 Hz und > 200 Hz gemessen werden. Dadurch ließe sich die Induktivität der Spule noch genauer bestimmen

Beurteilung der Güte

→ Die Induktivität konnte nicht mit geforderter Genauigkeit bestimmt werden. Demnach war schließlich eine plausibel erscheinende Beantwortung der Fragestellung möglich.

A.3.1.2. Irmgard - Screenshots Auswertungsdatei

	A(X)	B	C	D	E	F(Y)	G(yEr±)
Langname	Frequenz	Spannung	Z^2	Z^2 Fehler	Spannung	Z^2	Z^2 Fehler
Einheiten	Hz	V	Ohm^2	Ohm^2	V	Ohm^2	Ohm^2
Kommentare		U_g = 7,05			U_g=3,52 V		
F(x)=			5375,822/(B^2)	2))^2+(7,62/(B^2))^2+		1340,146/(E^2)2))^2+(3,81/(E^2))^2	
1	10	0,578	16091,22855	329,65451	0,29	15935,14863	379,79672
2	20	0,569	16604,29144	340,78349	0,287	16270,02877	389,14018
3	30	0,566	16780,77514	344,62022	0,285	16499,18129	395,56327
4	40	0,561	17081,23068	351,16213	0,284	16615,57727	398,83498
5	50	0,556	17389,82843	357,89453	0,282	16852,09497	405,50209
6	60	0,551	17706,86526	364,82493	0,279	17216,45405	415,82242
7	70	0,546	18032,65172	371,96125	0,277	17465,96463	422,92425
8	80	0,54	18435,60357	380,80838	0,274	17850,5248	433,92472
9	90	0,534	18852,21423	389,97919	0,27	18383,34705	449,27539
10	100	0,527	19356,35818	401,10916	0,267	18798,77681	461,33138
11	110	0,52	19880,99852	412,72907	0,263	19374,95121	478,17819
12	120	0,513	20427,26157	424,86837	0,26	19824,64497	491,42784
13	130	0,506	20996,35208	437,55876	0,256	20449,00513	509,96962
14	140	0,498	21676,35199	452,78081	0,252	21103,33207	529,58189
15	150	0,49	22389,9292	468,8227	0,247	21966,36562	555,72983
16	160	0,482	23139,33128	485,7449	0,243	22695,49019	578,06659
17	170	0,474	23926,9971	503,61357	0,239	23461,52903	601,77454
18	180	0,466	24755,57664	522,50124	0,235	24267,01675	626,96655
19	190	0,457	25740,23337	545,06735	0,231	25114,70924	653,7671
20	200	0,448	26784,82741	569,14963	0,226	26238,27238	689,74071
21							



A.3.1.3. Irmgard - Browserverlauf

https://www.google.com/search?client=firefox-b-ab&q=widerstand+farbcode

https://www.digikey.de/de/resources/conversion-calculators/conversion-calculator-resistor-color-code-4-band

https://www.google.com/search?client=firefox-b-ab&q=gewichteter+mittelwert+fehlerrechnung

https://www.physikerboard.de/topic,42819,-fehlerrechnung%3A-gewichteter-mittelwert.html

http://people.physik.hu-berlin.de/~julien/sub/Kurzeinfuerung%20-%20Fehlerrechnung.pdf

https://www.google.com/search?client=firefox-b-ab&q=gewichteter+mittelwert+fehlerrechnung

https://www.digikey.de/de/resources/conversion-calculators/conversion-calculator-resistor-color-code-4-band

A.3.1.4. Irmgard - Chronologische Fallstudie

Hinweis: Alle kursiv gesetzten Textteile entsprechen Einträgen aus dem Laborjournal (LB plus Seitenzahl).
Liest Aufgabenstellung und Fachwissenstext. Sieht sich die Platine an. Liest noch einmal Fachwissen. Notiert. *LB1: Planung: 1) relevanter mathematischer Zusammenhang (Formel wird abgeschrieben). –> für kleine Frequenzen verhält sich die Spule näherungsweise wie ein ohmscher Widerstand. Skizze mit korrektem Signalverlauf und Markierung des interessanten Bereiches. Fragestellung: Wie groß ist dieser Bereich?* [00:00:00-00:14:00]

Sieht sich Aufgabenstellung an und notiert. Sieht sich bei den Multimeter die Anschlüsse und Messbereiche an und denkt. Sieht am Surface nach welche Größenordnung und Toleranzbereiche der Widerstand besitzt. Notiert. *LB1: 2) Messaufbau: zeichnet Schaltplan aus Fachwissenstext ab. U_g konstant lassen während einer Messreihe. R_p=10 Ohm (±5%) auch konstant. Frequenz f variieren und Strom I_L indirekt über Spannungsmessung bestimmen, weil reale Voltmeter zu kleineren Verfälschungen führen als reale Amperemeter).* [00:14:00-00:25:13]

Notiert. *LB1: 4) Messplan (f<200Hz!) zunächst Frequenz bei 10 Hz beginnend in 10 Hz Schritten erhöhen, um gesamten Messbereich grob zu untersuchen. Anschließend ggf. Detailmessung. Führe die Messung für verschiedene U_G durch z. B. 5V, 10V –> nur unter max. Spulenstrom bleiben!* [00:25:13-00:28:30]

Nimmt Platine in die Hand. Notiert. *LB2: zunächst manuelle Widerstandsmessung mittels Multimeter: R_p=10,4 Ohm (± 0,1 Ohm).* [00:28:30-00:33:08]

Nimmt Fachwissenstext in die Hand. Macht den Frequenzgenerator an und sieht sich die Anzeige an. Schaut auf das Multimeter. Probiert am Frequenzgenerator aus, welche Schrittweiten möglich sind bei der Frequenz und V_{pp}. Denkt. Sieht sich Aufbau an. Liest Aufgabe. Sieht Multimeter an. Klemmt Platine und Multimeter zusammen. Baut Voltmeter parallel zu Widerstand ein. Befestigt sehr sorgfältig alle Kabel. Denkt über Messbereich nach und stellt ihn ein. Kontrolliert den Aufbau durch Ansehen und Abgleichen mit Schaltplan. Liest Aufgabe und Fachwissen. Notiert. *LB1b: Spulenstrom < 4A*. [00:33:08-00:50:01]

Schaltet Frequenzgenerator ein. Denkt. Stellt V_{pp} ein und kontrolliert den angezeigten Messwert an Multimeter. Klemmt ein zweites Multimeter parallel zum Frequenzgenerator ein (U_G). Sieht stark schwankende Messwerte. Sieht sich Einstellmöglichkeiten an. Regelt Frequenzgenerator hoch und sieht weiter schwanken. Regelt runter und baut Aufbau auseinander und schaltet nur Multimeter parallel zu FG. Sieht das Messwerte weniger schwanken und beim Hochregeln ganz aufhören zu schwanken. Er baut wieder seinen Aufbau un das Multimeter ein. Sieht wieder starkes Schwanken. Tauscht das Multimeter aus. Stellt den Messbereich ein. Macht Frequenzgenerator an. Regelt hoch. Überprüft Klemmen. Sieht sich die Messbereiche und Anschlüsse aller Multimeter an. Tauscht Multimeter. Sieht weiterhin starkes Schwanken. Regelt Frequenzgenerator deutlich hoch und sieht, dass Schwanken aufhört. Regelt runter bis Schwanken beginnt. Notiert. *LB1b: Spannungsmessgeräte "funktionierenërst ab 10 Hz (vorher schwankende Werte) und geben effektiv Werte aus. Anderes Messgerät bereits ab 5 Hz.* [00:50:01-01:10:37]

Baut Aufbau vollständig zusammen, schaltet ihn an, regelt bis zum Punkt, wo sich die Messwerte stabilisieren hoch. Kontrolliert den Sitz der Klemmen. Notiert. Beginnt mit Messwertaufnahme und kontrolliert währenddessen einzelne Messwertpaare durch Schnellauswertung. Nimmt erste Messreihe auf (V_{pp}=10 Volt). *LB1b: Durchführung: Messwerte in Origin dokumentiert. Ablesefehler der Spannung: ΔU=0,002 Volt (teilweise schwankende Messwerte, daher wurde die Genauigkeit der Anzeige erhöht).* [01:10:37-01:28:35]

Notiert. Versucht Fehlerrechnung mit Taschenrechner zu machen. Gibt schnell auf und macht diese mittels Origin automatisiert. L*B2: Auswertung Fehlerrechnung. Ziel: f und $(U_g/I_L)^2$ auftragen. f als fehlerfrei annehmen. Leitet sich die Gaußsche Fehlerfortpflanzung her.* [01:28:35-01:43:48]

Notiert. Wertet via Origin und Taschenrechner aus. *LB2b: grafische Auswertung der 1. Messreihe. Fitfunktion $y = A^2 + B^2x^2$. Notiert sich die Fitparameter. 1=128,9± 0,3 (Erwartung wäre R^2=108,16 Ohm bei idealer Spule. Für L=0,0805± 0.0007 Henry.* [01:43:48-02:00:12]

Bereitet Origin für zweite Messreihe vor. Macht Frequenzgenerator an, stellt V_{pp} auf 5 Volt. Notiert. Nimmt Daten auf. LB1: $U_G = 3,52\pm 0,005$Volt. [02:00:12-

02:19:00]

Auswertung wie erste Messreihe. Denkt nach. Sucht bei Google nach Fehlerrechnung gewichteter Mittelwert. Notiert. *LB2B: Mittelung der Werte (und Abschätzung des Fehlers, sodass die Fehlerbereiche der Teilergebnisse im Fehlerbereich des Ergebnisses liegen) –> L=(80±1)mH* [02:19:00-02:22:03]

Liest Aufgabenstellung, denkt, liest Fachwissen. Denkt. Baut Aufbau auseinander. Nimmt ein Multimeter, misst den ohmschen Widerstand der Spule. Notiert sich Wert. *LB2a: Messe mit dem Multimeter den ohmschen Widerstand der Spule* $R_L = (61,2 \pm 0,1)$ *Ohm.* [02:22:03-02:30:10]

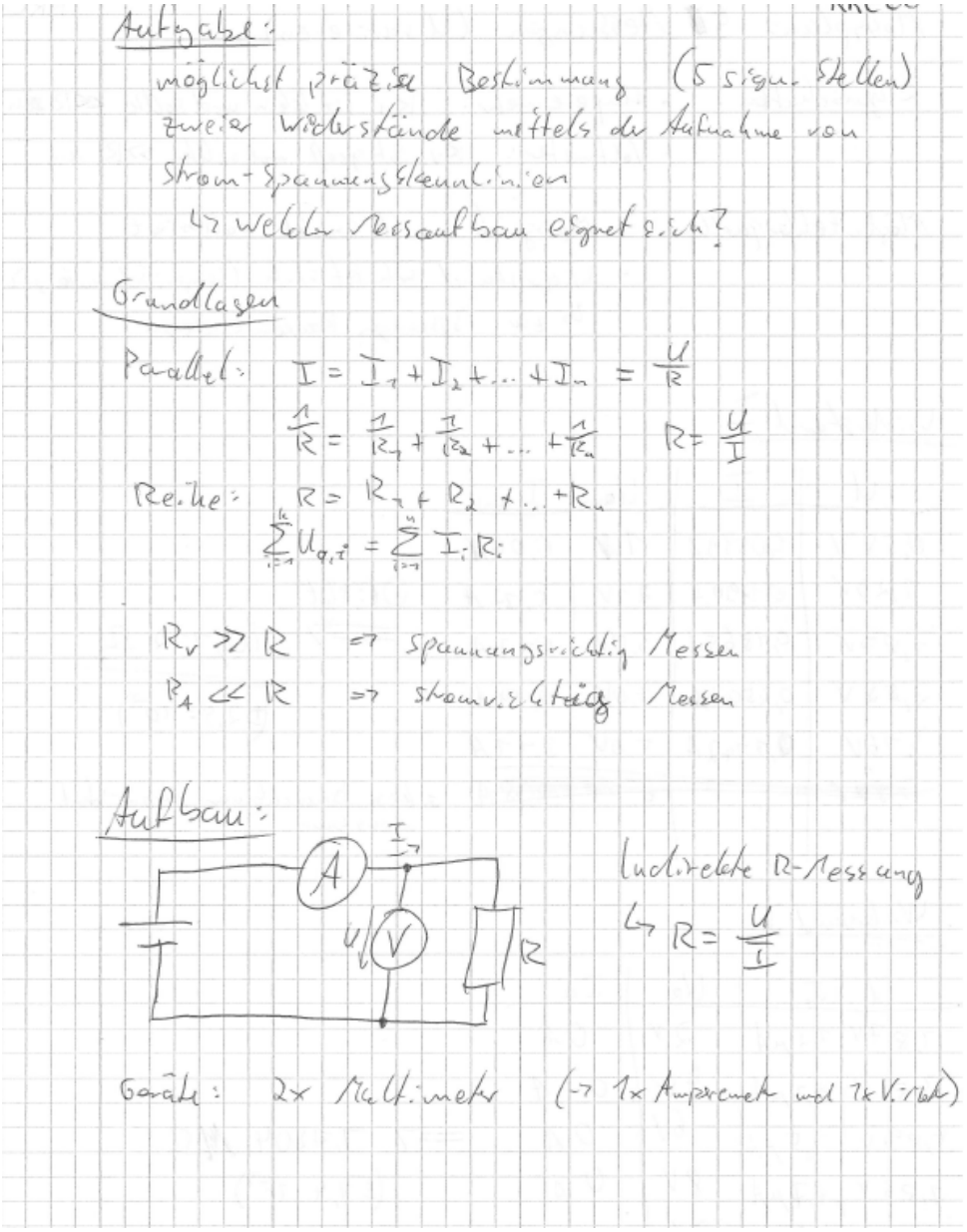
Notiert. *LB3a: Weiter: Auswertung. Die Spule kann schließlich als Reihenschaltung aus einer idealen Spule und einem ohmschen Widerstand (mit Betrag* R_L*=61,2 Ohm) angesehen werden. Für den Scheinwiderstand folgt [Funktionaler Zusammenhang]. Für kleine Frequenzen verhält sich die Spule näherungsweise wie ein ohmscher Widerstand. D. h.* $|Z| \approx R_L$*. Ich definieren näherungsweise so, dass gilt* $Z << 1,1R_L$*, d.h. die Abweichung vom Ohmschen Fall beträgt höchstens* 10%*. Damit ergibt sich folgende Rechnung für die max. Frequenz* f_0 *[Formelwust] Mit den Messwerten ergibt sich, dass die Grenzfrequenz bei 56 Hertz liegt. Da das Wort näherungsweise sehr weit ausgelegt werden kann, ist dies nur eine grobe Abschätzung, weshalb es nicht wirklich sinnvoll ist für diese Frequenz einen Fehler zu berechnen.* [02:30:10-02:37:32]

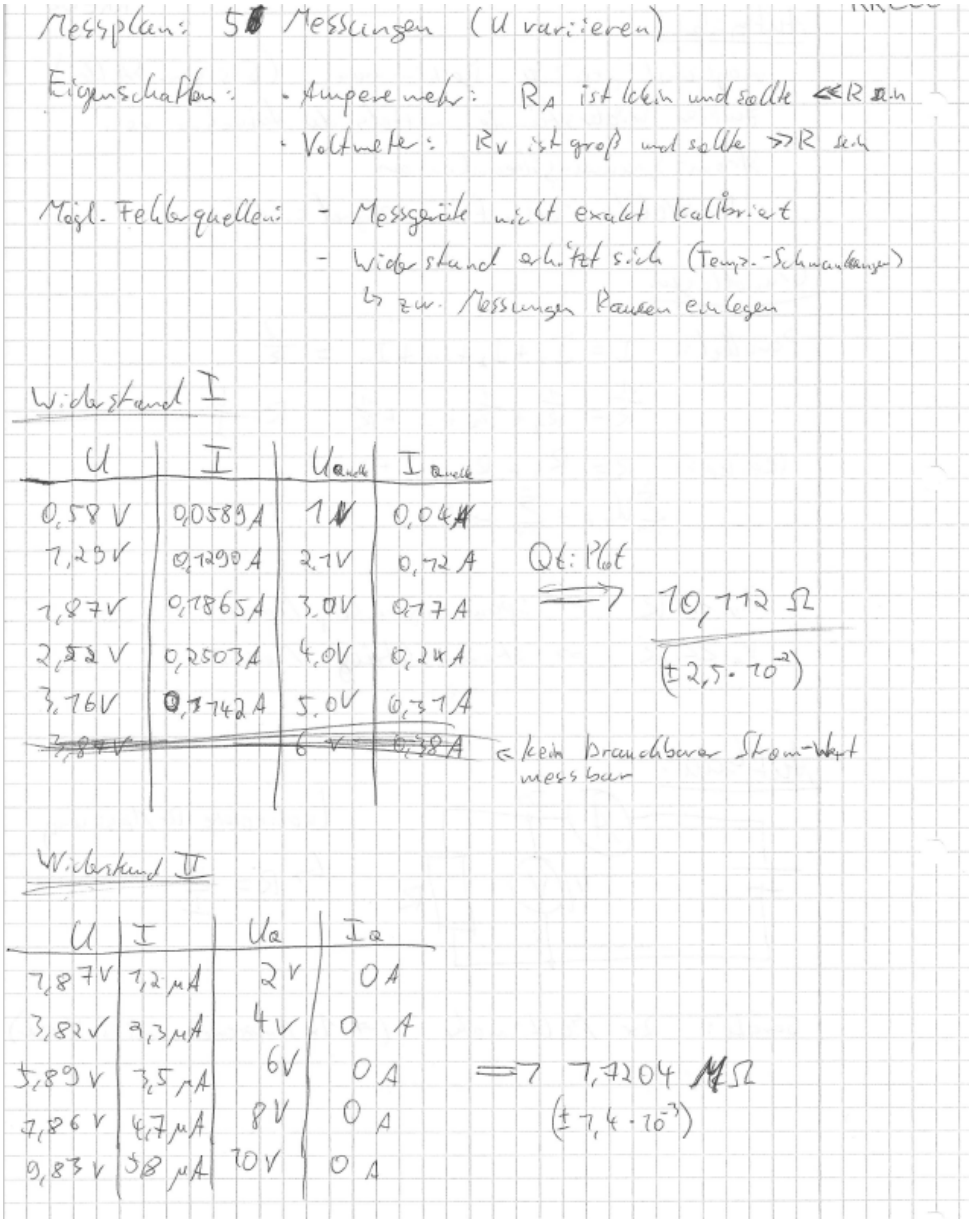
Notiert. *LB3B: Endergebnis: Für Frequenzen bis 56 Hertz verhält sich der induktive Widerstand der gegebenen Spule näherungsweise wie ein ohmscher Widerstand, d.h. der Scheinwiderstand weicht um max.* 10% *von einem entsprechenden ohmschen Widerstand ab. Optimierungen: Vergrößerung des möglichen messbaren Frequenzbereichs (mit anderen Messgeräten könnten Frequenzen <10Hz) gemessen werden. Dadurch ließe sich die Induktivität der Spule noch genauer bestimmen. Beurteilung der Güte: Die Induktivität konnte nicht mit geforderter Genauigkeit bestimmt werden. Dennoch war schließlich eine plausibel erscheinende Beantwortung der Fragestellung möglich.* [02:37:32-02:45:00]

Liest alles durch und überprüft ob, sie alles hat und beendet das Experiment. [02:45:00-02:56:19]

A.3.2. Beispielmaterialien - Helmut, der Novize bei der Aufgabe 1

A.3.2.1. Helmut - Laborjournal





Messplan: 5 Messungen (U variieren)

Eigenschaften:
- Amperemeter: R_A ist klein und sollte $\ll R_{Bauteil}$
- Voltmeter: R_V ist groß und sollte $\gg R_{Bauteil}$

Mögl. Fehlerquellen:
- Messgeräte nicht exakt kalibriert
- Widerstand erhitzt sich (Temp.-Schwankungen)
  ↳ zw. Messungen Pausen einlegen

Widerstand I

U	I	U_{Quelle}	I_{Quelle}
0,58 V	0,0589 A	1 V	0,04 A
1,29 V	0,1290 A	2 V	0,72 A
1,87 V	0,1865 A	3,0 V	0,17 A
2,52 V	0,2503 A	4,0 V	0,2 A
3,76 V	0,3742 A	5,0 V	0,37 A
~~3,89 V~~		6 V	~~0,38 A~~

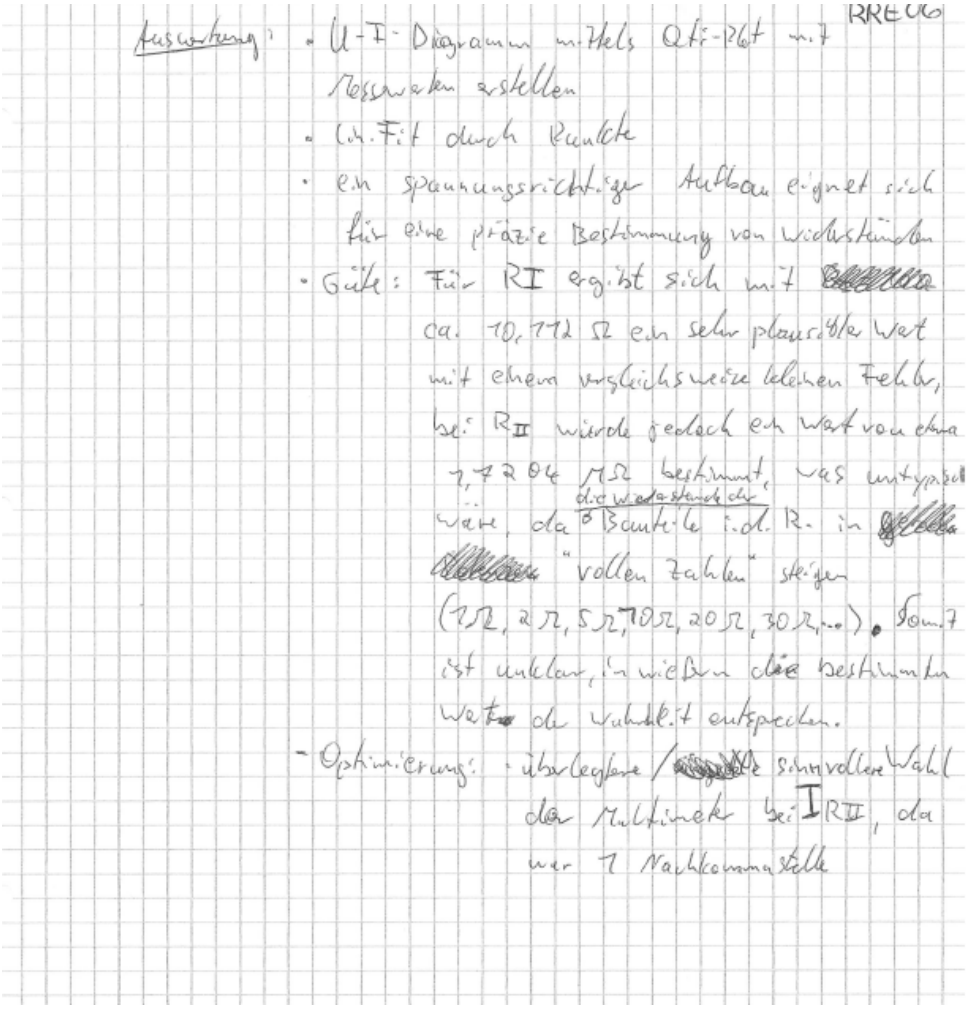
Qt: Plot ⟹ 10,112 Ω $(\pm 2{,}5 \cdot 10^{-2})$

← kein brauchbarer Strom-Wert messbar

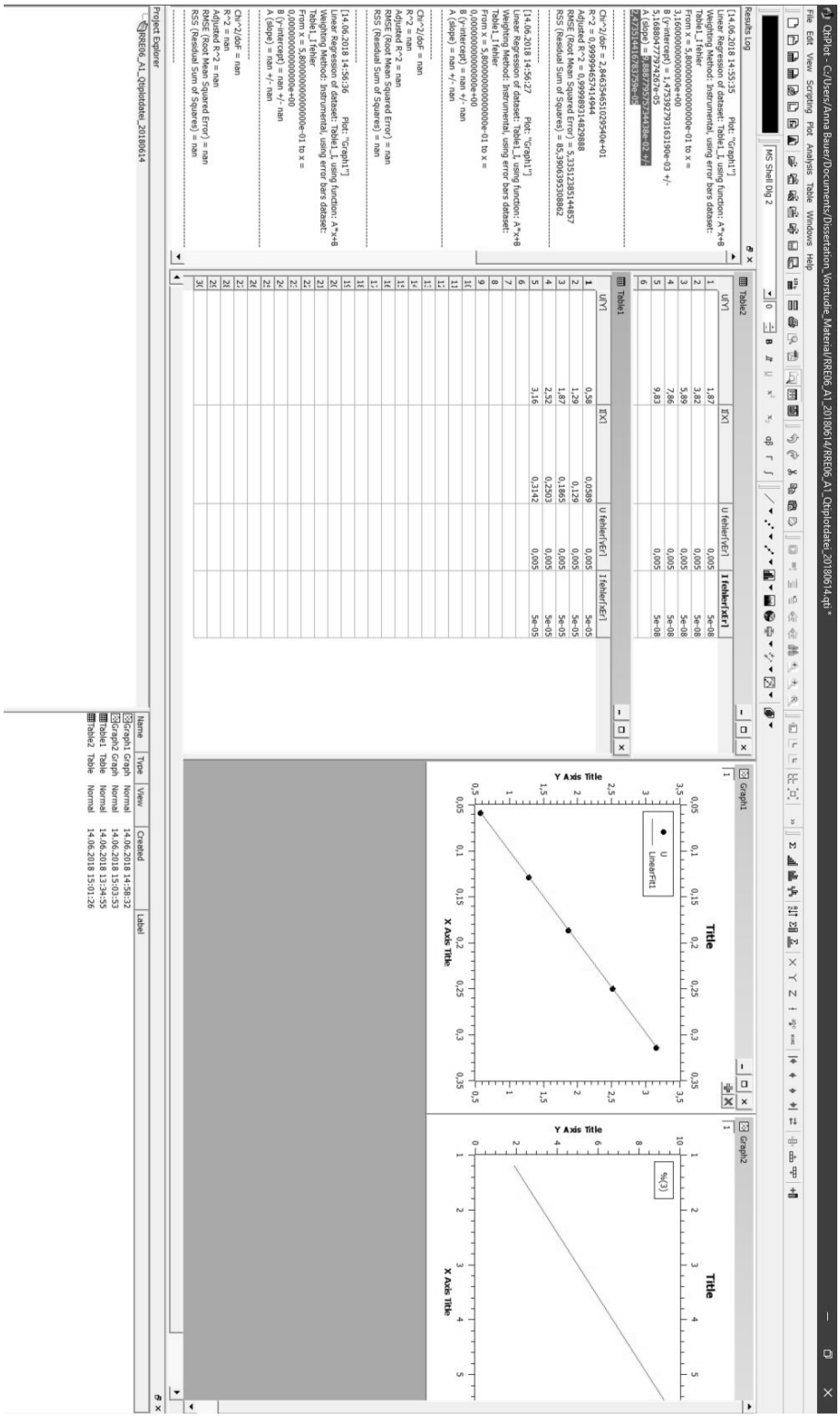
Widerstand II

U	I	U_Q	I_Q
7,87 V	7,2 µA	2 V	0 A
3,82 V	9,3 µA	4 V	0 A
5,89 V	3,5 µA	6 V	0 A
7,86 V	6,7 µA	8 V	0 A
9,83 V	58 µA	10 V	0 A

⟹ 7,7204 MΩ $(\pm 7{,}4 \cdot 10^{-3})$


Auswertung:
• U-I-Diagramm mittels Origin plot mit Regressionsgeraden erstellen
• Lin. Fit durch Punkte
• ein spannungsrichtiger Aufbau eignet sich für eine präzise Bestimmung von Widerständen
• Güte: Für RI ergibt sich mit ca. 10,772 Ω ein sehr plausibler Wert mit einem vergleichsweise kleinen Fehler, bei RII würde jedoch ein Wert von etwa 7,7204 MΩ bestimmt, was untypisch d.o. wie der Widerstände
wäre, da Bauteile i.d.R. in "vollen Zahlen" steigen (7Ω, 2Ω, 5Ω, 10Ω, 20Ω, 30Ω, ...). Somit ist unklar, in wieweit die bestimmten Werte der Wahrheit entsprechen.
- Optimierung: überlegtere / sinnvollere Wahl der Multimeter bei RII, da nur 1 Nachkommastelle

A.3.2.2. Helmut - Screenshots Auswertungsdatei



A.3.2.3. Helmut - Browserverlauf

https://www.google.com/search?client=firefox-b-ab&ei=a1ciW8qsJ8SusAGW5I74DQ&q=widerstand+bestimmen+schaltung&oq=widerstand+bestimmen+schaltung&gs_l=psy-ab.3..0.249186.260191.0.260365.22.22.0.0.0.0.186.2503.0j19.19.0....0...1.1.64.psy-ab..3.19.2493...0i131k1j0i67k1j0i22i30k1j0i22i10i30k1j0i13k1.0.NC4ubLVegrY

https://www.google.com/search?q=stromrichtige+messung&ie=utf-8&oe=utf-8&client=firefox-b-ab

https://www.elektronik-kompendium.de/sites/grd/1505061.htm

https://www.elektronik-kompendium.de/sites/grd/1505061.htm

https://de.wikipedia.org/wiki/Stromrichtige_Schaltung

https://www.leifiphysik.de/elektronik/halbleiterdiode/stromrichtige-und-spannungsrichtige-messung

https://www.leifiphysik.de/elektronik/halbleiterdiode/stromrichtige-und-spannungsrichtige-messung

A.3.2.4. Helmut - Chronologische Fallstudie

Hinweis: Alle kursiv gesetzten Textteile entsprechen Einträgen aus dem Laborjournal (LB plus Seitenzahl).
Liest die Aufgabenstellung und das Fachwissen. Notiert sich die grundlegenden Formeln zum Ohmschen Gesetz und die beiden Auswahlregeln für die Wahl des messmethodischen Settings *LB1: Fragestellung (wortwörtlich*). [00:00:00-00:00:02]

Sieht sich die beiden Schachteln mit den Widerständen an und nimmt sich aus jeder Schachtel den Präzisionswiderstand. Er sieht sich die Multimeter an, nimmt Kabel und Klemmen und baut den 10 Ohm Widerstand ein. Legt alles auf das Glasbrett. Nimmt sich ohne nachzudenken ein Multimeter und baut es in den Aufbau ein. Er entfernt wieder die Kabel und das Multimeter und legt alles zur Seite. Nimmt sich den Tipler in die Hand. Liest das Fachwissen. Sucht bei Google nach "Widerstand bestimmen Schaltung". Geht auf Leifi.de und liest sich den Artikel zu strom- und spannungsrichtigem Messen von Halbleiterdioden durch. Sieht in die Luft. Liest weiter. [00:00:02-00:14:07]

Beginnt die Kabel in die Hand zu nehmen und denkt nach. Schaut auf die Spannungsquellen und erneut ins Fachwissen. Sucht bei Google nach "Wikipedia stromrichtige Schaltung". Scrollt lange. Lehnt sich zurück und liest. Erneute Suche bei Google nach ßtromrichtige Messung". Geht auf Elektronik-Kompendium "Widerstandsmessung". Liest und denkt. Geht zurück zu Leifi.de. [00:14:07-00:22:27]

Beginnt mit dem Aufbau, in dem er zuerst die Kabel an die Spannungsquelle anschließt. Dann baut er den Widerstand und das Multimeter ein. Er schaltet die Spannungsquelle an. Verändert den Messbereich des Multimeters. Er regelt die Spannungsquelle in 0,1V Schritten bis 1 Volt schrittweise hoch. Das Multimeter zeigt ihm aufgrund des falschen Messbereichs keine Werte mehr an. Er schaltet wieder runter. Regelt wieder hoch. Verändert den Messbereich (von großem Messbereich in kleinen). [00:22:27-00:27:44]

Frage: Anna, was glaubst du verträgt der Widerstand? Ich will ihn nicht rösten. Ich nenne ihm die Leistungsgrenze. Er fragt, ok, welche Spannung bedeutet dies? Ich sage ihm, dass er sich das berechnen kann. Er antwortet: Ok, dann mache ich so lange bis er raucht.[00:27:44- 00:31:10]

Er stellt 1V ein und überprüft ob der Widerstand heiß wird. Er schaltet die Spannungsquelle aus. Liest noch einmal die Leifi-Seite und das Fachwissen. Nimmt den Taschenrechner und tippt 1 Volt und 58 (!) Ampere ein [Kann Anzeige von Multimeter nicht lesen]. [00:31:10-00:31:30]

Er schaltet das Multimeter parallel zum Widerstand und stellt ein Volt ein. Er wechselt die Kabel an den Ausgängen der Spannungsquelle. Er tippt die erhaltenen Werte in den Taschenrechner und erhält das Ergebnis 6 Watt. Er stellt noch einmal 1 Volt ein, rechnet nach und erhält den Wert 2,4 Watt. Baut das Multimeter aus der Schaltung aus. Verbiegt die Beine des Widerstandes. Schaltet das Multimeter wieder in Reihe und nutzt es damit als Voltmeter. Er regelt die Spannung bis 5 Volt hoch. Er geht wieder auf Elektronik-Kompendium.de und liest. Sieht sich seinen Aufbau an. [00:31:30-00:34:29]

Er nimmt ein zweites Multimeter in die Hand und sieht es sich an. Er macht die Spannungsquelle aus und scheint irritiert zu sein. Er nimmt ein drittes Multimeter in die Hand, nimmt Kabel und testet die Messbereichseinstellungen. Er baut das Multimeter parallel zum Widerstand ein. Schaltet die Spannungsquelle an, überprüft bis 2 Volt die angezeigten Werte. Macht alles aus. Sagt: Ich bin so dumm. [00:34:29-00:39:06]

Beginnt im Laborbuch zu schreiben. Macht einen Haken an die Aufgabenstellung *LB1: Schaltplan spannungsrichtiges Messen. Indirekte R-Messung –> R=U/I* [00:39:06-00:41:36]

Liest noch einmal auf Leifi.de Schaltet die Spannungsquelle von 0-5 Volt durch und sieht sich die Messwerte auf Multimeter an. Schaltet runter und überprüft ob der Widerstand warm geworden ist. Notiert. *LB2: Messplan: 5 Messungen (U variieren)* [00:41:36-00:44:26]

Frage: Bestimme die Charakteristika der Geräte, heißt das Beschreiben der Geräte

bzw. was die Geräte machen? Ich: Es geht um die Funktionalität und was man bei den Geräten beachten muss. Er: Ja, der eine Widerstand ist groß und der andere klein, das ist der entscheidende Unterschied. [00:44:26-00:47:00]

Notiert. *LB2: Eigenschaften: Amperemeter: Innenwiderstand ist klein und sollte viel kleiner als R sein. Voltmeter: Innenwiderstand ist groß und sollte viel größer als R sein. Mögliche Fehlerquellen: 1) Messgeräte nicht exakt kalibriert, 2) Widerstand erhitzt sich (Temperaturschwankungen) –> zur Messung Pausen einlegen. Liest und denkt nach.* [00:47:00-00:48:30]

Baut den R_1 in den Aufbau ein. Schaltet die Spannungsquelle an und schaltet von 1 Volt auf 2 Volt. Notiert. *LB2: Tabelle U|I|U Quelle|I Quelle* [00:48:30-00:51:42]

Schaltet den Aufbau noch einmal an und überprüft die Messwerte für 2 Volt Spannung. Frage: Muss ich das Multimeter verstehen? Wenn ich 1 Volt durchjage beim Multimeter 20 Volt eingestellt habe, dann ist der Punkt bei 20? D.h. vorne ist 10? Ich verstehe nicht, warum sich das Komma nicht verschiebt, wenn ich den Messbereich wechsele. Ich erkläre ihm die Anzeige. [00:51:42-00:52:36]

Er schaltet die Spannungsquelle runter und wieder hoch auf 5 Volt und wieder auf 0 Volt. Wechselt die Messbereiche und schaltet wieder hoch und runter. Notiert sich 1 Messwertpaar. Regelt in 1 Volt Schritten bis 5 Volt hoch. Bei 4 Volt fasst er den Widerstand an, um die Temperatur zu überprüfen. Messwerte schwanken, was ignoriert wird. Er schaltet die Spannungsquelle auf 0 Volt und pustet auf den Widerstand. Macht die Spannungsquelle wieder an und schaltet auf 6 Volt. Der Widerstand raucht. Notiert sich Beobachtung. Schaltet Spannungsquelle aus. Pustet. Schaltet an. Der Widerstand raucht. Schaltet Spannungsquelle schnell wieder aus. Streicht den Messwert für 6 Volt weg. (Brauchbarer Messwert kam nicht zu stande, weil er außerhalb des gewählten Messbereiches war. Er hat die Fehlermeldung auf das Rauchen und nicht auf den Messbereich bezogen und dementsprechend nicht umgestellt). *LB2: Messwerte für R_1. Ab 6 Volt keine brauchbaren Stromwerte messbar.* [00:52:36-00:55:47]

Pustet auf Widerstand. Schaltet die Spannungsquelle auf 6 Volt. Der Widerstand qualmt. Schaltet sofort wieder aus und pustet. Beendet die Messung für den Widerstand 1. [00:55:47-01:01:48]

Notiert. Tauscht den Widerstand R_1 gegen R_2. Aufbau weiterhin spannungsrichtig. Testet den Aufbau auf Funktionalität und wundert sich über kleine Messwerte. Nimmt das dritte Multimeter und schaltet es parallel zur Spannungsquelle. Schließt den Aufbau dabei kurz und ist im falschen Messbereich (Warnton). Baut den Widerstand aus und überprüft die Größenordnung mit Multimeter. Nimmt ein viertes Multimeter. Baut dieses parallel zu R_2 ein. Ruckelt an den Kabeln. Regelt die Spannungsquelle bis 8 Volt hoch. Regelt runter. Denkt. Regelt auf

2V denkt. Sieht sich Messwerte von R_1 an. Rechnet mittels Taschenrechner alle Messwerte mehrfach händisch. Schaltet die Spannungsquelle aus und denkt. Liest Leifi.de. Überprüft die Verkabelung, indem er die Kabel nacheinander anhebt. Gleicht diese mit Leifi ab. Geht mit den Fingern die Verbindungen ab. Macht das Multimeter aus. Baut Kabel aus und sortiert sie. Baut wieder zusammen. Schaltet Spannnungsquelle an und regelt auf 2 Volt hoch und macht noch einmal die Schnellauswertung (wieder 1,6 MOhm). Tauscht die Reihenfolge der Kabel am Widerstand (!!). Macht wieder Testmessung und Schnellauswertung. Tauscht die Widerstände R_2 und R_1 . Erneute Messung von R_1 bis 3 Volt. Regel runter und denkt. *LB2: Tabelle für R_2 wie bei R_1* [01:01:48-01:03:55]

Wechselt Widerstände und nimmt Messwerte (5 Stück von 2 Volt bis 10 Volt in 2 Volt Schritten) auf. *LB2: Messwerte für R_2* [01:03:55-01:17:00]

Öffnet Qtiplot. Gibt die Daten ein. Als Messunsicherheit werden die Ablesegenauigkeiten der Multimeter verwendet. Plottet R_1. Fittet mehrfach. Notiert sich das Ergebnis 10,112 Ohm (keine Messunsicherheit). Wertet R_2 gleich aus. Notiert Ergebnis 1,72 Mohm (Ohne Unsicherheit). Frage: Muss ich bei dem Widerstand einen Fehler angeben? Notiert daraufhin Messunsicherheit unter Ergebnis. [01:17:00-01:18:00]

Misst mit dem Multimeter die Größenordnung von R_2 nach (2,043 MOHm). Diese Erkenntnis wird ignoriert und auch nicht notiert. [01:18:00-01:34:41]

Notiert. *LB3: Auswertung: 1) U-I-Diagramm mittels Qtiplot mit Messwerten erstellen, 2) lin Fit durch Punkte, 3) ein spannungsrichtiger Aufbau eignet sich für eine präzise Bestimmung von Widerständen. Güte: Für R_1 ergibt sich mit ca. 10,112 Ohm ein sehr plausibler Wert mit einem vergleichsweise kleinen Fehler. Bei R_2 wurde jedoch ein Wert von etwa 1,72 MOhm bestimmt, was untypisch wäre, da die Widerstände der Bauteile i. d. R. in "vollenSZahlen steigen (1 Ohm, 2 Ohm, 5 Ohm, 10 Ohm, 20 Ohm, 30 Ohm, ...) Somit ist unklar inwiefern die bestimmten Werte der Wahrheit entsprechen.* [01:34:41-01:37:14]

Notiert. *LB3: Optimierungen: überlegtere/sinnvollere Wahl der Multimeter bei R_2 da nur eine Nachkommastelle* [01:37:14-01:47:12]

A.4. Übersicht über die Stichprobe

Übersicht über die bisherigen Leistungen der Proband:innen

Leistung	n	min	max	Spannweite	Median	Mittelwert	Standard-abweichung
Abiturnote	15	1,0	2,5	1,5	1,6	1,6	0,4
Letzte Schulnote in der Physik	16	0,7	2,0	1,3	1,3	1,3	0,4
Notenmittel in der Experimentalphysik	16	1,0	3,7	2,7	2,1	2,2	0,9
Notenmittel in der Theoretische Physik	15	1,0	5,0	4,0	2,0	2,2	2,7
Notenmittel in Laborpraktika	14	1,0	2,0	1,0	1,3	1,4	0,4
Notenmittel in der Mathematik	15	1,0	4,0	3,0	3,0	2,7	1,2

Übersicht über Selbsteinschätzungen der Proband:innen

Selbsteingeschätzte Sicherheit mit ...	n	min	max	Spannweite	Median	Mittelwert	Standard-abweichung
Inhaltsfeld Elektrodynamik	16	2	4	2	3	2,9	0,6
Digitale Multimeter	16	2	4	2	4	3,4	0,7
Strommessung	16	3	4	1	3	3,3	0,5
Spannungsmessung	16	3	4	1	3	3,3	0,5
Oszilloskop	16	1	4	3	2	2,5	0,9
Spulen	16	2	4	2	3	3,0	0,7
Funktionsgenerator	16	2	4	2	3	2,6	0,7
Gleichstromkreise	16	2	4	2	3	3,1	0,7
Wechselstromkreise	16	2	4	2	3	2,6	0,7

Abb. 38: Tabellarische Übersicht über die mittels des Fragebogens von den Proband:innen genannten (schulische und universitäre) Leistungen (oben) und der Selbsteinschätzungen bzgl. des Beherrschen der Inhaltsfelder, Messmethoden und Geräte (vierstufige Likert-Skala sehr unsicher - sehr sicher) (unten).

Übersicht über die charakteristischen Merkmale der Proband:innen

Proband / Vgl.kriterien	Wolfgang	Herbert	Horst	Adrian	Piet	Manfred	Hans	Lea	Ulrike	Elisa	Henrike	Antonia	Mia	Ina
Status	Nov.	Nov.	Exp.	Nov.	Nov.	Nov.	Nov.	Exp.	Nov.	Nov.	Nov.	Exp.	Nov.	Nov.
Aufgabe	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2
Dauer Planung (h)	0:11	0:32	0:28	0:13	0:03	0:18	0:17	0:21	0:24	0:19	0:17	0:03	0:38	0:22
Dauer Aufbaus (h)	0:31	0:42	0:56	1:07	0:19	0:20	0:24	0:44	0:37	0:28	0:44	0:15	0:17	0:16
Dauer Durchführung (h)	0:28	0:16	0:11	0:24	0:26	0:13	0:27	0:55	0:24	0:21	0:03	0:29	0:17	0:31
Dauer Auswertung (h)	0:34	0:33	0:19	1:12	0:47	0:38	0:36	0:31	1:34	0:51	1:01	1:30	0:37	0:53
Dauer insgesamt (h)	2:25	2:05	2:13	3:54	1:38	1:33	1:50	2:41	3:11	2:31	2:17	2:20	1:54	2:10
Abbruch der Aufgabe	-	Ja	-	-	-	-	-	-	-	-	Ja	-	Ja	-
Anzahl beantwortete Aspekte Fragestellung	1	1	1	1	0	1	0	2	1	1	0	1	0	1
Relative Abw. zwischen Ergebnis & Referenzwert	940 %; 886 %	33900 % -	2 %; 8 %	3 %; 8 %	12 %; 11 %	3 % 1%	16 %; 1 %	6 %	15%	6 %	-	17 %	1 %	36 %
Fachliche Fehler	1	1	0	2	3	0	0	0	1	0	4	0	1	2
Methodische Fehler	4	10	0	8	3	4	2	0	7	1	1	4	10	3

Abb. 39: Tabellarische Übersicht über die charakterisierenden Merkmale der Bearbeitung der Aufgaben durch die Proband:innen.

A.5. Mögliche Musterlösung zur weniger komplexen Aufgabe 1 - Horst, der Experte

Horst hat kurz vor seiner Teilnahme an diesem Projekt seine Doktorarbeit im Bereich der Experimentalphysik [summa cum laude] abgeschlossen. Er hat sein Abitur mit 1,2 gemacht und als letzte Physiknote eine 1,0 gehabt. Zwischen Schule und Studium hat er den Grundwehrdienst absolviert. Er hat alle Kurse des Bachelor Physik bis auf die drei Mathematikkurse mit einer 1,0 abgeschlossen. Er absolvierte über vier Semester das traditionelle Anfängerpraktikum an der Universität Paderborn. In der Mathematik hat er alle Kurse mit einer 3,0 absolviert. Er gibt an, dass er *gerne*[115] experimentiert und in sich in seiner Freizeit mit Hobbyastronomie beschäftigt. Hinsichtlich der Frage nach dem Stellenwert des Experimentierens im Studium merkt er an, dass Experimentieren hilft Zusammenhänge zu erkennen und zu quantifizieren. Das Experiment sei der Verbindungspunkt zwischen Intuition und quantifiziertem Wissen. Im Stimulated Recall Interview hat er dies noch ausführlicher erläutert:

> Ünd wenn ich meine Theorie nehme und der Natur diese Frage quasi stelle, dann kommt hoffentlich das raus, was meine Theorie sagt. Wenn es nicht herauskommt, kann ich es quantifizieren und feststellen, es stimmt irgendwas nicht. Und auf die Art und Weise ist das genau dieser Zusammenhang zwischen [dem], was ich mit Intuition meine. Ich habe eine ungefähre Ahnung, was passieren sollte, hoffentlich passiert das und wenn das passiert, dann weiß ich genau, wie es passiert, kann das quantifizieren. Die Intuition basiert letztendlich natürlich auf dem eigenen Erfahrungswissen, aber natürlich auch auf dem Studienwissen, aus dem [...] theoretischen Wissen."[00:04:26-4]

Er fühlt sich *sehr sicher*[116] im Themenfeld Elektrodynamik. Bezogen auf die in der Aufgabe 1 genutzten Experimentiermaterialien (Widerstände, Digitale Multimeter, Spannungsquellen) fühlt er sich *sicher*. Im anschließenden Stimulated Recall Interview bestätigt er diese Selbsteinschätzungen noch einmal und führt an, dass er die Materialien lange nicht benutzt hat und dementsprechend nicht mehr ohne nach zu denken mit ihnen arbeiten kann [01:05:40-0].

Aufgrund seiner abgeschlossenen Promotion (experimentelle Physik) kann Horst auf Basis der personenbezogenen Daten als Experte eingestuft werden. Weiterhin sind seine im Studium erreichten Noten in den einzelnen Veranstaltungen deutlich besser als die der Mehrheit der untersuchten Studierenden.

In der experimentellen Aufgabenstellung 1 soll von ihm die Fragestellung beant-

[115] Vierstufige Likertskala von sehr gerne bis sehr ungerne
[116] Vierstufige Likertskala sehr sicher bis sehr unsicher

wortet werden:

> Welcher Messaufbau eignet sich für eine möglichst präzise Bestimmung (fünf signifikante Stellen) zweier unterschiedlicher elektrischer Widerstände mittels der Aufnahme von Strom-Spannungskennlinien?

Die zur Verfügung stehenden Materialien können in Tabelle 3 eingesehen werden.

Horst beginnt die Bearbeitung der Aufgabe 1, indem er zunächst den kurz Text zum Fachwissen und die Aufgabenstellung liest. Er macht sich dabei keinerlei Notizen. Erst im Verlauf der Dimensionierung und Realisierung des experimentellen Setups notiert er die Schaltkreise, methodische Hinweise sowie physikalische Zusammenhänge. Dies ist darauf zurück zu führen, dass es aufgrund der geringen Komplexität des physikalischen Inhalts zu Beginn keine Unklarheiten oder neue Informationen gab (in Stimulated Recall Interview bestätigt).

Der kurzen Phase der ersten Klärung schließt die Planung und Dimensionierung des experimentellen Setups[117] an. Dazu schätzt er zunächst die ungefähren Größenordnungen der zu erwartenden Messwerte [Spannung, Strom abhängig von der Größenordnung der beiden Widerstände] sowie den Grenzen der Experimentiermaterialien ab und sichert diese mittels theoretisch bestimmter Werte ab. In dieser Phase findet eine ausführliche Analyse der Experimentiermaterialien und Planung des experimentellen Setups statt. Dabei werden alle Geräte [Spannungsquellen, Multimeter] hinsichtlich der jeweiligen Spezifika analysiert und alle Widerstandswerte der zur Verfügung stehenden Widerstände [Bauteil] bestimmt. Weiterhin überprüft er seine theoretisch erwarteten Werte sowie das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten des Experimentes experimentell. Die getätigten Handlungen fasst er im Stimulated Recall Interview folgendermaßen zusammen:

> "Das heißt ich fange an, den Aufbau so einfach wie möglich zu halten, erst einmal ein paar Tests zu machen auch mit Geräten, die nicht richtig dimensioniert sind, Hauptsache man sieht erst einmal, dass die Plausibilität stimmt. Das heißt, keine Ahnung, ich schaue mir Grenzbereiche an, schaue mir kein Signal an, schaue mir an, gibt es irgendwo Probleme oder verliere ich irgendwo eine Größenordnung an Signal oder irgendwas."[00:04:49-4]

Er legt messmethodisch aufgrund der theoretischen Auswahlkriterien (Verhältnis der Größenordnungen der Widerstände im Vergleich zu den Innenwiderständen der Multimeter) den spannungrichtigen Aufbau für den Widerstand R_1 (10Ω) und

[117] Für eine Aufstellung der zur Verfügung stehenden Experimentiermatierialien und -geräte siehe Tab. 3.

für den Widerstand R_2 (2,3 MΩ) den stromrichtigen Messaufbau fest. Er fragt nach den Datenblättern der Geräte, die jedoch nicht vorhanden sind. Er verwendet keine Internetsuche, sondern verwendet Größenordnungen der Innenwiderstände von Spannungsquellen und Multimetern, die er aufgrund seiner Erfahrung im Kopf hat. In Bezug zur Fragestellung ist dies jedoch methodisch nur unvollständig durchdacht, da beide Widerstände auch mit beiden messmethodischen Ansätzen bestimmt werden müssten, um anhand der Abweichungen des Ergebnisses vom Referenzwert die theoretischen Auswahlkriterien zu verifizieren. Dies merkt er auch am Ende des Experimentes an, verzichtet jedoch auf diese Messreihen. Den zweiten Teil der Fragestellung [Bestimmung der Widerstandswerte mit fünf signifikanten Stellen] übersieht er.

Basierend auf den bestimmten Widerstandswerten und theoretisch bestimmten maximalen Werten für die Spannung und Stromstärke sowie einer groben Bestimmung der erwarteten elektrischen Leistung pro Widerstand sucht er sich für die beiden messmethodischen Realisierungen (strom- und spannungsrichtiger Aufbau) die jeweils passenden Geräte aus.

Für den unbekannten Widerstand R_1 (10 Ω) wählt er die Spannungsquelle mit dem größten Messbereich. Die Auswahl des Multimeters schätzt er bei diesem Bauteil als irrelevant ein, da alle die notwendige Präzision für eine angemessene Auflösung besitzen. Als Widerstand wählt er um eine höhere Leistungsbegrenzung des Bauteils zu erhalten, den Lastwiderstand. Hier notiert er sich auch in Bezug auf die berechneten Leistungsgrenzen, dass er beim Experimentieren, darauf achten muss, dass die Leistungsgrenzen nicht erreicht werden sollten, um den Einfluss der Temperaturabhängigkeit von Widerständen zu minimieren. Die Wahl der Geräte und Materialien in Bezug auf die Fragestellungen und untereinander abgestimmt kann als sehr plausibel eingeschätzt werden.

Für den unbekannten Widerstand R_2 (2,3 Ω) wählt er die Spannungsquelle mit der feinsten Auflösung, um sicher zu stellen, dass er innerhalb des Messbereiches genug Messwerte aufnehmen kann. Als Widerstand wählt er wieder den Präzisionswiderstand. Hierbei merkt er an, dass die Leistungsgrenzen des Widerstandes mit den vorhandenen Geräten nicht überschritten werden können. Bei dieser experimentellen Realisierung legt er großen Wert auf die Auswahl des Multimeters. Er nimmt das Multimeter mit der feinsten Auslösung, das Messungen im μA-Bereich ermöglicht. Wiederum ist die Auswahl der Komponenten vor dem Hintergrund theoretischer Überlegungen sowie in Bezug auf die Wechselwirkungen der Geräte untereinander sehr plausibel.

Der Aufbau der jeweiligen experimentellen Realisierung erfolgt sehr kontrolliert, indem schrittweise die Komponenten in den Stromkreis integriert und mittels Testmessung sowie einer Schnellauswirkung überprüft werden.

Nach Verbindung der Spannungsquelle mit dem Multimeter fällt ihm auf, dass er unplausible Messwerte angezeigt bekommt. Daraufhin kontrolliert er zunächst die Verkabelungen und danach die Einstellungsmöglichkeiten der Spannungsquelle sowie die Messbereiche der Multimeter. Er zieht alle Kabel ab und baut alles auseinander bevor er alles, beginnend von einer Seite des Stromkreises ohne Spannungsmessgerät, wieder neu verkabelt. Nachdem er schließlich das Multimeter wechselt, erhält er sinnvolle Werte und regelt die Spannung konstant hoch bis zum nächsten Messbereich. Er wechselt wieder zum ursprünglichen Multimeter zurück und schaltet dieses in Reihe zum Widerstand. Nach erneutem Wechsel der Messgeräte ruft er die Testleitung und sagt, dass die Sicherung des kleinsten Messbereiches des Multimeters kaputt sei. Er wählt daraufhin ein anderes Multimeter, welches er jedoch für die schlechtere Wahl in Bezug auf die Fragestellung hält.

Nach erfolgreichem Testen des Setups inklusive der rechnerischen Überprüfung eines Messwertpaares, legt er für die Bestimmung des Widerstands R_1 mittels des spannungsrichtigen Aufbaus den Messplan fest. Dieser besteht aus 13 grob äquidistanten Messpunkten verteilt über den gesamt möglichen Messbereich bis zur oberen Begrenzung durch die Leistungsgrenze des Bauteils.

Bei der Messwertaufnahme notiert Horst sich die auf den Multimetern angezeigten Werte nachdem er jedes Mal die Anzeige der Spannungsquelle abgeglichen hat. Im Stimulated Recall Interview sagt er hierzu, dass er sicher gehen wollte, dass es nicht z. B. durch die verwendeten Krokodilklemmen zu Spannungseinbrüchen kommt, weil er z. B. den Aufbau destabilisiert. Beim Hochregeln stellt er keine ëxakten"Werte ein, sondern wählt in ungefähr 100 mV Schritt, wobei er ab 5 Volt die Schrittweite erhöht. Im Stimulated Recall Interview merkt er dazu an, dass es nur um das Verhältnis der Spannungs- und Stromstärke-Messwerte ankommt, weswegen er sich nicht die Mühe gemacht hat immer eine exakt gleiche Schrittweite einzustellen. Er notiert sich weiterhin jeweils, ab wann er beim Multimeter in den nächsten Messbereich wechseln musste.

Nach der Messwertaufnahme gibt er die Messwerte in ein grafisches Auswertungsprogramm ein. Er plottet die Messwerte inklusive Messunsicherheiten (Ablesegenauigkeit des Multimeters) und fittet für die Bestimmung des Widerstandswertes linear. Dabei sagt er, dass er sehr zufrieden ist, weil der Graph [aufgrund der Temperaturabhängigkeit von Widerständen] wie vermutet in der Nähe der Leistungsgrenze abknickt. Er entscheidet sich dann noch Lücken im Messwertverlauf zu schließen und nimmt noch zwei weitere Messwerte auf. Er merkt zu dem vom Programm bestimmten Wert für den Y-Achsenabschnitt nichts an. Er notiert auch sonst keine weiteren Beobachtungen. Im Stimulated Recall Interview fasst er zusammen, welche Analyseschritte er beim Ansehen des Graphen absolviert:

> "Dann nächster Schritt war dann, die Daten zu plotten. Das wäre [...] in Anführungszeichen Plausibilitätscheck. Liegen die [Messwerte], liegen

> alle auf der erwarteten, in diesem Fall der erwarteten Gerade? Sind irgendwo große Lücken, wo ich sagen würde, ja, da könnte, in dieser Lücke könnte was sein, dass es zu einem wirren Ausreißer kommt oder so was.

Die angesprochenen Lücken hat er im Experiment durch eine erneute Messwertaufnahme minimiert. Ausreißer sind nicht aufgetreten, weswegen es dazu keine Notiz gibt. Den Y-Achsenabschnitt findet er nicht problematisch, weil das Bauteil eine Toleranzangabe von 5% besaß. Innerhalb dieser Grenze befindet sich sein Ergebnis von $R_1 = 9,81 \pm 0,04\Omega$ [1,9% Abweichung zur Herstellerangabe].

Als Messunsicherheit für das Ergebnis verwendet er die durch das Programm bestimmte Messunsicherheit. Systematische Abweichungen sind ihm nicht aufgefallen [Bestätigung im Stimulated Recall Interview]. Im Stimulated Recall Interview führt er weiterhin aus, warum er keine intensivere Analyse der Messunsicherheiten getätigt hat:

> "Bei meinen Experimenten ist [...] für mich nicht wichtig, ob die Daten perfekt in Anführungszeichen kalibriert oder gar geeicht sind. Weil ich letztendlich, das interessante ist, Veränderungen zu messen. Und es ist sicherlich nicht die 100 prozentig richtige Herangehensweise für diesen Aufbau, aber in meinen meisten experimentellen Fällen ist es das allerwichtigste, [...] dass meine Aufbauten beispielsweise stabil sind, weil ich insbesondere Veränderungen messe. Relative Veränderungen sind immer einfacher zu messen. Dementsprechend. Tatsächlich, die Fehler, glaube ich, die ich hier mache, spielen in meinem alltäglichen Bereich [Forschung] etwas weniger eine Rolle."[00:11:23-2]

Nach Auswertung der ersten Messreihe baut er das experimentelle Setup nach dem geplanten stromrichtigen Aufbau auf und testet diesen wie den vorherigen. Der Messplan wird wiederum auf Basis der Testmessungen und theoretischen Überlegungen festgelegt. Bei diesem Setup können die Leistungsgrenzen des Bauteils nicht überschritten werden. Stattdessen ist der wichtige Aspekt die Auflösung des Multimeters, da sehr kleine Stromstärken erwartet werden. Der Messbereich wird am unteren Rand dadurch beschränkt. Im oberen Bereich stellt der Messbereich der Spannungsquelle den limitierenden Faktor dar. Horst sucht zunächst nach der ersten messbaren Stromstärke und beginnt die Messung bei 3,95 V in 2V-Schritten (von 4V bis 31V). Bevor er sich die Werte notiert, kontrolliert er jeweils die Anzeige der Spannungsquelle und die der beiden Multimeter. Bei 14V zögert er kurz, kommt jedoch durch mathematische Prüfung des Messwertpaares zu dem Schluss, dass alles passt und setzt die Messwerterfassung fort. Auch hierbei notiert er sich wieder, wann Messbereichswechsel stattgefunden haben. Zum Schluss führt Horst noch eine Kontrollmessung durch. Dazu regelt er die Spannung runter und schaut, ob seine aufgenommenen Werte korrekt sind. Außerdem misst er den

Widerstandswert von R_2 erneut mit dem Multimeter nach und identifiziert den Ring mit der Toleranzangabe. Die Größenordnung stimmt und die Abweichung ist somit in Ordnung.

Die Auswertung der Messwerte und Bestimmung der Messunsicherheit erfolgt wie bei der ersten Messreihe. Als Ergebnis erhält er $R_2 = 2,174 \pm 0,06 M\Omega$ [3% Abweichung zur Herstellerangabe]. Er führt die Abweichung darauf zurück, dass er aufgrund der defekten Sicherung nicht das präzisere Multimeter verwenden konnte.

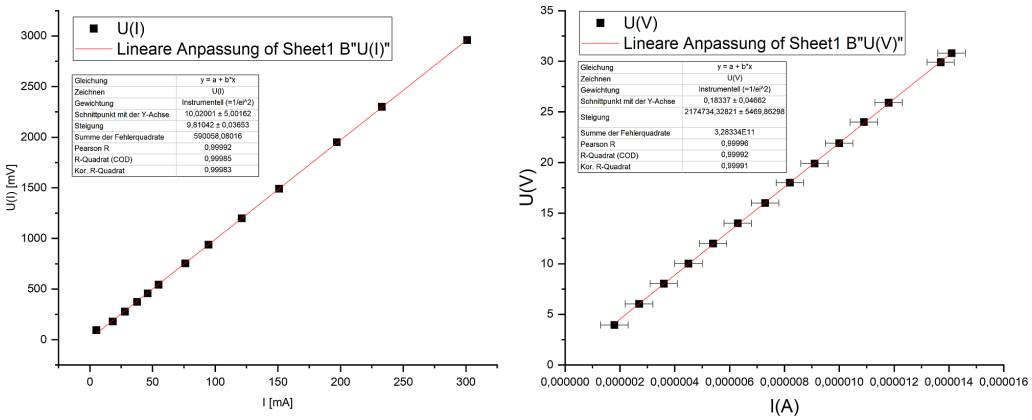


Abb. 40: Ergebnis Experte Aufgabe 1

Abschließend merkt er an, dass er mehr Messreihen aufnehmen müsste, um die verschiedenen Messmethoden zu vergleichen. Auch hätte er bei der Auswertung systematische Abweichungen stärker beachten können (z. B. Innenwiderstand der Spannungsquellen). Weiterhin vermutet er, dass die Abweichungen in den Ergebnissen wahrscheinlich durch die "wackeligen"Krokodilklemmen verursacht wurden.

A.6. Expertenrating - Ergebnisse

Im Folgenden sind die statistischen Werte der Gruppenvergleiche und des Vergleichs der Experteneinschätzung mit den Einschätzungen der Entwicklerin dargestellt. Die Markierungen in den Tabellen werden in den jeweiligen Kapiteln im Haupttext erläutert.

A.6.1. Expertenrating - Ergebnisse der Gruppenvergleiche

Gruppenvergleich
Leiter:innen vs. Betreuer:innen

Handlung	N(L)	N(B)	U(N(L); N(B))	Z	p (exakt, 2-seitig)	d (Pearson)
I1	7	8	28,0	0,000	1,000	0,000
I2	7	8	28,0	-0,304	1,000	0,000
I3	7	8	17,0	-0,498	0,241	0,348
I4	7	8	26,0	-0,761	0,785	0,077
I5	7	8	15,0	-1,121	0,128	0,411
I6	7	8	20,5	-0,249	0,430	0,237
I7	6	7	17,5	-0,791	0,462	0,300
I8	6	7	11,0	-0,806	0,237	0,437
I9	6	7	11,0	-1,263	0,168	0,456
I10	6	7	15,5	-0,548	0,559	0,272
I11	6	7	18,0	-1,191	0,853	0,161
I12	6	7	17,0	-0,401	0,551	0,174
S1	3	7	8,0	-0,455	0,617	0,192
S2	3	7	4,5	-2,340	0,192	0,452
S3	3	7	9,0	0,000	0,725	0,117
S4	3	7	8,5	-0,484	0,750	0,164
S5	3	7	8,5	-0,330	0,800	0,149
S6	3	7	5,0	-1,069	0,183	0,497
S7	3	7	6,5	0,000	0,550	0,298
S8	3	7	10,5	0,000	1,000	0,000
S9	3	7	9,0	-0,816	1,000	0,207
S10	3	6	9,0	0,000	1,000	0,000
S11	3	6	3,0	-1,917	0,131	0,577
S12	3	6	7,5	-1,610	0,857	0,154
S13	3	6	6,0	-1,118	0,333	0,471
S14	3	6	7,0	-1,643	0,881	0,192
S15	3	6	7,5	-0,894	1,000	0,236
S16	3	6	1,5	-0,904	0,060	0,680
S17	3	6	8,0	0,000	1,000	0,118
S18	3	6	7,5	-0,894	1,000	0,236
S19	3	6	3,0	-0,944	0,131	0,569
S20	3	6	5,0	-1,783	0,345	0,358
S21	3	6	4,5	-2,195	0,369	0,408
S22	3	6	5,0	-1,893	0,357	0,355
S23	3	6	8,5	-0,537	1,000	0,047
S24	3	6	7,5	-0,894	1,000	0,236
S25	4	3	6,0	0,000	1,000	0,000
S26	4	3	5,0	-1,155	1,000	0,154
S27	4	3	4,0	-0,408	0,429	0,437
S28	4	3	5,5	-0,632	1,000	0,085
S29	4	3	5,0	-0,624	0,714	0,167
S30	4	3	5,5	-0,632	1,000	0,085
S31	4	3	5,5	-0,632	1,000	0,085
S32	4	3	4,0	-1,048	0,486	0,280
T1	4	3	4,5	-0,408	1,000	0,327
T2	4	3	2,0	-0,771	0,200	0,550
T3	4	3	5,0	-0,524	0,800	0,140
T4	4	3	4,000	-0,771	0,543	0,275
T5	4	3	4,000	-1,394	0,314	0,298
T6	4	3	6,000	0,000	1,000	0,000
T7	4	3	2,000	-1,247	0,143	0,667

Fortsetzung Gruppenvergleich Leiter:innen vs. Betreuer:innen

Handlung	N(L)	N(B)	U(N(L); N(B))	Z	p (exakt, 2-seitig)	d (Pearson)
T8	4	3	5,000	-1,155	1,000	0,154
T9	4	3	3,000	-0,837	0,371	0,447
P1	4	3	6,000	0,000	1,000	0,000
P2	4	3	4,500	-0,279	0,771	0,224
P3	4	3	4,000	-0,540	0,657	0,289
P4	4	3	4,500	-0,837	0,829	0,224
P5	4	3	3,000	-0,540	0,400	0,433
M1	11	8	40,000	-0,403	0,909	0,192
M2	11	8	42,000	-0,232	1,000	0,153
M3	11	8	39,500	-0,454	0,728	0,104
M4	11	8	33,000	-1,058	0,365	0,243
M5	11	8	42,500	-0,137	0,967	0,231
M6	11	8	44,000	0,000	1,000	0,342
M7	11	8	38,000	-0,524	0,674	0,120
M8	11	8	26,500	-1,626	0,120	0,373
M9	8	8	24,000	-1,464	0,467	0,336
M10	8	8	31,000	-0,111	0,958	0,126
M11	8	8	28,000	-0,436	0,738	0,237
M12	8	8	26,500	-0,612	0,763	0,140
M13	8	8	31,000	-0,139	1,000	0,132
M14	8	8	24,000	-0,894	0,466	0,205
M15	8	8	16,500	-1,701	0,170	0,390
M16	8	8	28,000	-0,522	1,000	0,120
M17	8	8	16,000	-1,767	0,122	0,405
M18	8	8	1,500	-1,304	0,301	0,299
M19	8	8	9,000	-1,522	0,009	0,349
M20	8	8	15,000	-1,877	0,094	0,431
M21	8	8	21,000	-1,215	0,240	0,279
M22	8	8	15,500	-1,031	0,200	0,237
B1	5	4	7,500	-0,354	0,444	0,373
B2	5	4	8,000	-0,636	0,810	0,179
B3	5	4	8,500	-1,706	0,762	0,135
B4	5	4	7,500	-0,618	0,627	0,217
B5	5	4	10,000	0,000	1,000	0,000
B6	5	4	6,000	-0,207	0,476	0,349
B7	5	4	8,000	-0,866	0,762	0,183
B8	5	4	7,000	-1,225	0,714	0,258
B9	5	4	9,500	-0,414	1,000	0,044
B10	5	4	7,000	-1,299	0,643	0,274

Gruppenvergleich
Rest Deutschlands vs. Universität Paderborn

Handlung	N(R)	N(U)	U(N(R); N(U))	Z	p (exakt, 2-seitig)	d (Pearson)
I1	9	6	27,000	0,000	1,000	0,000
I2	9	6	25,000	-0,304	0,723	0,078
I3	9	6	23,000	-0,498	0,709	0,129
I4	9	6	22,000	-0,761	0,512	0,196
I5	9	6	18,000	-1,121	0,355	0,289
I6	9	6	25,000	-0,249	0,868	0,064
I7	8	5	17,500	-0,791	1,000	0,219
I8	8	5	15,000	-0,806	0,690	0,224
I9	8	5	12,500	-1,263	0,336	0,350
I10	8	5	17,000	-0,548	1,000	0,152
I11	8	5	14,000	-1,191	0,417	0,330
I12	8	5	17,500	-0,401	0,821	0,111
S1	4	6	10,000	-0,455	0,695	0,144
S2	**4**	**6**	**1,500**	**-2,340**	**0,033**	**0,740**
S3	4	6	12,000	0,000	1,000	0,000
S4	4	6	10,000	-0,484	0,929	0,153
S5	4	6	10,500	-0,330	0,786	0,104
S6	4	6	8,000	-1,069	0,500	0,338
S7	4	6	12,000	0,000	1,000	0,000
S8	4	6	12,000	0,000	1,000	0,000
S9	4	6	10,000	-0,816	1,000	0,258
S10	4	5	10,000	0,000	1,000	0,000
S11	4	5	3,000	-1,917	0,119	0,639
S12	4	5	4,500	-1,610	0,278	0,537
S13	4	5	7,500	-1,118	0,444	0,373
S14	4	5	4,000	-1,643	0,167	0,548
S15	4	5	8,000	-0,894	1,000	0,298
S16	4	5	6,500	-0,904	0,397	0,301
S17	4	5	10,000	0,000	1,000	0,000
S18	4	5	8,000	-0,894	1,000	0,298
S19	4	5	6,500	-0,944	0,484	0,315
S20	4	5	3,000	-1,783	0,119	0,594
S21	**4**	**5**	**1,500**	**-2,195**	**0,032**	**0,732**
S22	4	5	2,500	-1,893	0,079	0,631
S23	4	5	8,000	-0,537	0,810	0,179
S24	4	5	8,000	-0,894	1,000	0,298
S25	6	1	3,000	0,000	1,000	0,000
S26	6	1	1,000	-1,155	0,429	0,437
S27	6	1	2,500	-0,408	1,000	0,154
S28	6	1	2,000	-0,632	1,000	0,239
S29	6	1	2,000	-0,624	1,000	0,236
S30	6	1	2,000	-0,632	1,000	0,239
S31	6	1	2,000	-0,632	1,000	0,239
S32	6	1	1,000	-1,048	0,714	0,396
T1	6	1	2,500	-0,408	1,000	0,154
T2	6	1	1,500	-0,771	0,714	0,291
T3	6	1	2,000	-0,524	1,000	0,198
T4	6	1	1,500	-0,771	0,714	0,291
T5	6	1	0,500	-1,394	0,429	0,527
T6	6	1	3,000	0,000	1,000	0,000
T7	6	1	1,000	-1,247	0,286	0,471

Fortsetzung Gruppenvergleich
Rest Deutschlands vs. Universität Paderborn

Handlung	N(R)	N(U)	U(N(R); N(R))	Z	p (exakt, 2-seitig)	d (Pearson)
T8	6	1	1,0	-1,155	0,429	0,437
T9	6	1	1,5	-0,837	1,000	0,316
P1	6	1	3,0	0,000	1,000	0,000
P2	6	1	2,5	-0,279	1,000	0,105
P3	6	1	2,0	-0,540	1,000	0,204
P4	6	1	1,5	-0,837	1,000	0,316
P5	6	1	2,0	-0,540	1,000	0,204
M1	13	6	2,0	-0,214	0,842	0,149
M2	13	6	2,5	-1,481	0,255	0,340
M3	13	6	1,5	-1,017	0,468	0,233
M4	13	6	2,0	-1,022	0,351	0,234
M5	13	6	1,0	-0,726	0,527	0,167
M6	13	6	1,0	-0,045	0,967	0,234
M7	13	6	2,5	-0,325	0,849	0,075
M8	13	6	2,0	-0,247	0,903	0,057
M9	10	6	2,0	-1,890	0,125	0,434
M10	10	6	1,0	-0,172	0,913	0,435
M11	10	6	1,5	-0,225	0,917	0,534
M12	10	6	1,0	-1,265	0,346	0,290
M13	10	6	2,0	-0,645	0,716	0,148
M14	10	6	3,0	-1,617	0,153	0,371
M15	10	6	0,5	-1,343	0,000	0,308
M16	10	6	1,0	-0,944	0,588	0,217
M17	10	6	2,0	-1,566	0,134	0,359
M18	10	6	1,5	-1,189	0,999	0,273
M19	10	6	3,0	-1,151	0,388	0,264
M20	10	6	4,0	-1,509	0,195	0,346
M21	10	6	2,0	-0,281	0,189	0,064
M22	10	6	5,0	-0,907	0,900	0,208
B1	8	1	3,5	-0,354	1,000	0,118
B2	8	1	2,5	-0,636	1,000	0,212
B3	8	1	0,0	-1,706	0,111	0,569
B4	8	1	2,5	-0,618	1,000	0,206
B5	8	1	4,0	0,000	1,000	0,000
B6	8	1	3,5	-0,207	1,000	0,069
B7	8	1	2,0	-0,866	1,000	0,289
B8	8	1	1,0	-1,225	0,667	0,408
B9	8	1	3,0	-0,414	1,000	0,138
B10	8	1	1,0	-1,299	0,444	0,433

Gruppenvergleich
Doktor:innen vs. Masterand:innen

Handlung	N(D)	N(M)	U(N(D); N(M))	Z	p (exakt, 2-seitig)	d (Pearson)
I1	9	5	22,5	0,000	1,000	0,000
I2	9	5	20,0	-0,420	0,685	0,112
I3	9	5	16,0	-0,912	0,453	0,244
I4	9	5	19,0	-0,589	0,715	0,157
I5	9	5	18,0	-0,643	0,655	0,172
I6	9	5	13,5	-1,270	0,262	0,339
I7	8	4	14,0	-0,707	1,000	0,204
I8	8	4	16,0	0,000	1,000	0,000
I9	8	4	13,0	-0,574	0,703	0,166
I10	8	4	14,0	-0,415	1,000	0,120
I11	8	4	10,0	-1,342	0,418	0,387
I12	8	4	8,5	-1,427	0,180	0,412
S1	4	5	9,0	-0,261	0,825	0,087
S2	4	5	7,5	-0,652	0,627	0,217
S3	4	5	9,5	-0,130	1,000	0,043
S4	4	5	9,0	-0,271	1,000	0,090
S5	4	5	8,0	-0,509	0,762	0,170
S6	4	5	8,5	-0,447	1,000	0,149
S7	4	5	7,0	-0,757	0,524	0,252
S8	4	5	10,0	0,000	1,000	0,000
S9	4	5	7,5	-1,118	0,444	0,373
S10	4	4	6,0	-1,000	1,000	0,354
S11	4	4	6,5	-0,500	1,000	0,177
S12	4	4	8,0	0,000	1,000	0,000
S13	4	4	6,0	-1,000	1,000	0,354
S14	4	4	3,5	-1,423	0,371	0,503
S15	4	4	8,0	0,000	1,000	0,000
S16	4	4	5,0	-0,929	0,514	0,328
S17	4	4	4,0	-1,512	0,429	0,535
S18	4	4	6,0	-1,000	1,000	0,354
S19	4	4	7,0	-0,310	0,886	0,110
S20	4	4	3,0	-1,528	0,229	0,540
S21	4	4	4,5	-1,084	0,486	0,383
S22	4	4	5,0	-0,899	0,514	0,318
S23	4	4	8,0	0,000	1,000	0,000
S24	4	4	6,0	-1,000	1,000	0,354
S25	6	1	3,0	0,000	1,000	0,000
S26	6	1	1,0	-1,155	0,429	0,437
S27	6	1	2,5	-0,408	1,000	0,154
S28	6	1	2,0	-0,632	1,000	0,239
S29	6	1	2,0	-0,624	1,000	0,236
S30	6	1	2,0	-0,632	1,000	0,239
S31	6	1	2,0	-0,632	1,000	0,239
S32	6	1	1,0	-1,048	0,714	0,396
T1	6	1	2,5	-0,408	1,000	0,154
T2	6	1	1,5	-0,771	0,714	0,291
T3	6	1	2,0	-0,524	1,000	0,198
T4	6	1	1,5	-0,771	0,714	0,291
T5	6	1	0,5	-1,394	0,429	0,527
T6	6	1	3,0	0,000	1,000	0,000
T7	6	1	1,0	-1,247	0,286	0,471

Fortsetzung Gruppenvergleich Doktor:innen vs. Masterand:innen

Handlung	N(D)	N(M)	U(N(D); N(M))	Z	p (exakt, 2-seitig)	d (Pearson)
T8	6	1	1,0	-1,155	0,429	0,437
T9	6	1	1,5	-0,837	1,000	0,316
P1	6	1	3,0	0,000	1,000	0,000
P2	6	1	2,5	-0,279	1,000	0,105
P3	6	1	2,0	-0,540	1,000	0,204
P4	6	1	1,5	-0,837	1,000	0,316
P5	6	1	2,0	-0,540	1,000	0,204
M1	7	11	37,5	-0,109	1,000	0,325
M2	7	11	35,5	-0,375	1,000	0,186
M3	7	11	21,5	-1,849	0,079	0,465
M4	7	11	33,5	-0,520	0,728	0,119
M5	7	11	31,5	-0,701	0,544	0,161
M6	7	11	29,5	-0,844	0,458	0,194
M7	7	11	22,5	-1,531	0,176	0,351
M8	7	11	23,5	-1,510	0,143	0,346
M9	6	9	25,5	-0,300	1,000	0,175
M10	6	9	26,0	-0,126	0,952	0,132
M11	6	9	19,5	-0,915	0,420	0,229
M12	6	9	23,5	-0,439	0,586	0,110
M13	6	9	23,0	-0,609	0,710	0,152
M14	6	9	25,5	-0,190	0,909	0,148
M15	6	9	19,5	-0,933	0,481	0,233
M16	6	9	12,0	-1,160	0,089	0,290
M17	6	9	16,5	-1,303	0,267	0,326
M18	6	9	17,5	-1,152	0,271	0,288
M19	6	9	20,0	-0,869	0,463	0,217
M20	6	9	9,0	-1,234	0,138	0,308
M21	6	9	16,0	-1,377	0,228	0,344
M22	6	9	23,0	-0,544	0,706	0,136
B1	7	2	3,5	-1,871	0,222	0,624
B2	7	2	6,0	-0,321	1,000	0,107
B3	7	2	5,0	-0,645	0,583	0,215
B4	7	2	6,5	-0,156	0,972	0,052
B5	7	2	7,0	0,000	1,000	0,000
B6	7	2	3,5	-1,095	0,417	0,365
B7	7	2	5,0	-0,655	0,583	0,218
B8	7	2	4,0	-0,926	0,667	0,309
B9	7	2	5,0	-0,626	0,444	0,209
B10	7	2	6,0	-0,327	1,000	0,109

Gruppenvergleich
Doktor:innen vs. Professor:innen

Handlung	N(D)	N(P)	U(N(D); N(P))	Z	p (exakt, 2-seitig)	d (Pearson)
I1	9	1	4,5	0,000	1,000	0,000
I2	9	1	4,0	-0,333	1,000	0,105
I3	9	1	1,5	-1,118	0,600	0,354
I4	9	1	3,0	-0,645	1,000	0,204
I5	9	1	0,0	-1,671	0,200	0,528
I6	9	1	2,0	-0,942	0,700	0,298
I7	8	1	3,5	-0,354	1,000	0,118
I8	8	1	4,0	0,000	1,000	0,000
I9	8	1	2,0	-0,857	0,778	0,286
I10	8	1	2,5	-0,707	1,000	0,236
I11	8	1	2,5	-0,694	1,000	0,231
I12	8	1	1,5	-1,157	0,333	0,386
S1	4	1	1,5	-0,373	1,000	0,167
S2	4	1	0,0	-1,581	0,200	0,707
S3	4	1	1,5	-0,363	1,000	0,162
S4	4	1	1,0	-0,816	1,000	0,365
S5	4	1	0,0	-1,451	0,400	0,649
S6	4	1	1,5	-0,500	1,000	0,224
S7	4	1	1,5	-0,373	1,000	0,167
S8	4	1	2,0	0,000	1,000	0,000
S9	4	1	1,5	-0,500	1,000	0,224
S10	4	1	0,0	-2,000	0,200	0,894
S11	4	1	0,5	-1,118	0,600	0,500
S12	4	1	0,0	-2,000	0,200	0,894
S13	4	1	1,5	-0,500	1,000	0,224
S14	4	1	1,5	-0,500	1,000	0,224
S15	4	1	0,0	-2,000	0,200	0,894
S16	4	1	0,0	-1,581	0,400	0,707
S17	4	1	1,0	-0,791	1,000	0,354
S18	4	1	2,0	0,000	1,000	0,000
S19	4	1	1,5	-0,500	1,000	0,224
S20	4	1	0,0	-1,491	0,200	0,667
S21	4	1	0,5	-1,118	0,600	0,500
S22	4	1	0,5	-1,118	0,800	0,500
S23	4	1	0,0	-1,491	0,200	0,667
S24	4	1	1,5	-0,500	1,000	0,224
A1	10	1	4,0	-0,469	1,000	0,141
A2	10	1	3,5	-0,497	1,000	0,150
A3	10	1	3,0	-0,742	1,000	0,224
A4	10	1	4,0	-0,469	1,000	0,141
A5	10	1	3,5	-0,612	1,000	0,185
A6	10	1	2,0	-1,049	0,545	0,316
A7	10	1	4,0	-0,471	1,000	0,142
E1	4	1	0,0	-1,414	0,400	0,632
E2	4	1	0,5	-1,118	0,600	0,500
E3	4	1	1,0	-0,816	1,000	0,365
E4	4	1	2,0	0,000	1,000	0,000
E5	4	1	1,0	-0,791	1,000	0,354
E6	4	1	0,5	-1,118	0,800	0,500
E7	4	1	1,0	-0,816	1,000	0,365
U1	4	1	0,0	-1,491	0,200	0,667

Fortsetzung Gruppenvergleich Doktor:innen vs. Professor:innen

Handlung	N(D)	N(P)	U(N(D); N(P))	Z	p (exakt, 2-seitig)	d (Pearson)
U2	4	1	1,0	-0,816	1,000	0,365
U3	4	1	0,0	-1,491	0,200	0,667
U4	4	1	0,5	-1,225	0,400	0,548
U5	4	1	0,0	-1,581	0,400	0,707
U6	4	1	1,5	-0,373	1,000	0,167
U7	4	1	1,5	-0,500	1,000	0,224
M1	11	1	3,5	-0,707	1,000	0,204
M2	11	1	4,5	-0,445	1,000	0,129
M3	11	1	4,5	-0,447	1,000	0,129
M4	11	1	3,5	-0,696	1,000	0,201
M5	11	1	2,5	-0,967	0,583	0,279
M6	11	1	0,5	-1,508	0,333	0,435
M7	11	1	3,0	-0,781	1,000	0,225
M8	11	1	4,0	-0,572	1,000	0,165
M9	11	1	4,0	-0,333	1,000	0,096
M10	9	1	1,5	-1,095	0,700	0,316
M11	9	1	1,5	-1,095	0,700	0,316
M12	9	1	1,0	-1,323	0,500	0,382
M13	9	1	3,5	-0,500	1,000	0,144
M14	9	1	0,5	-1,581	0,400	0,456
M15	9	1	3,0	-0,559	1,000	0,161
M16	9	1	2,0	-1,000	1,000	0,289
M17	9	1	1,5	-1,107	0,700	0,319
M18	9	1	1,5	-1,095	0,700	0,316
M19	9	1	0,5	-1,451	0,400	0,419
M20	9	1	0,5	-1,461	0,300	0,422
M21	9	1	0,5	-1,496	0,300	0,432
M22	9	1	2,5	-0,797	1,000	0,230

Gruppenvergleich
Masterand:innen vs. Professor:innen

Handlung	N(M)	N(P)	U(N(M); N(P))	Z	p (exakt, 2-seitig)	d (Pearson)
I1	5	1	2,5	0,000	1,000	0,000
I2	5	1	2,0	-0,316	1,000	0,129
I3	5	1	2,0	-0,311	1,000	0,127
I4	5	1	2,0	-0,447	1,000	0,182
I5	5	1	0,0	-1,508	0,167	0,616
I6	5	1	0,0	-1,581	0,167	0,645
I7	4	1	2,0	0,000	1,000	0,000
I8	4	1	2,0	0,000	1,000	0,000
I9	4	1	1,5	-0,500	1,000	0,224
I10	4	1	1,5	-0,500	1,000	0,224
I11	4	1	2,0	0,000	1,000	0,000
I12	4	1	1,5	-0,373	1,000	0,167
S1	5	1	2,0	-0,316	1,000	0,129
S2	5	1	1,0	-0,891	0,667	0,364
S3	5	1	1,5	-0,707	1,000	0,289
S4	5	1	1,5	-0,707	1,000	0,289
S5	5	1	0,5	-1,225	0,667	0,500
S6	5	1	1,5	-0,707	1,000	0,289
S7	5	1	1,5	-0,603	0,833	0,246
S8	5	1	2,5	0,000	1,000	0,000
S9	5	1	2,5	0,000	1,000	0,000
S10	4	1	0,0	-1,581	0,400	0,707
S11	4	1	0,5	-1,225	0,400	0,548
S12	4	1	0,5	-1,118	0,600	0,500
S13	4	1	2,0	0,000	1,000	0,000
S14	4	1	0,5	-1,118	0,600	0,500
S15	4	1	0,0	-2,000	0,200	0,894
S16	4	1	1,5	-0,363	1,000	0,162
S17	4	1	2,0	0,000	1,000	0,000
S18	4	1	1,5	-0,500	1,000	0,224
S19	4	1	1,5	-0,363	1,000	0,162
S20	4	1	0,0	-1,581	0,200	0,707
S21	4	1	0,0	-1,451	0,400	0,649
S22	4	1	0,0	-1,491	0,200	0,667
S23	4	1	0,0	-1,491	0,200	0,667
S24	4	1	2,0	0,000	1,000	0,000
A1	7	1	2,5	-0,577	1,000	0,204
A2	7	1	2,0	-0,688	1,000	0,243
A3	7	1	0,5	-1,404	0,375	0,496
A4	7	1	1,5	-0,956	0,625	0,338
A5	7	1	2,5	-0,571	1,000	0,202
A6	7	1	2,5	-0,571	1,000	0,202
A7	7	1	3,0	-0,378	1,000	0,134
E1	3	1	0,5	-0,943	0,750	0,472
E2	3	1	0,0	-1,414	0,250	0,707
E3	3	1	0,5	-1,000	1,000	0,500
E4	3	1	1,5	0,000	1,000	0,000
E5	3	1	0,5	-0,943	0,750	0,472
E6	3	1	1,0	-0,577	1,000	0,289
E7	3	1	1,5	0,000	1,000	0,000
U1	4	1	1,5	-0,500	1,000	0,224

Fortsetzung Gruppenvergleich
Masterand:innen vs. Professor:innen

Handlung	N(M)	N(P)	U(N(M);N(P))	Z	p (exakt, 2-seitig)	d (Pearson)
U2	4	1	0,0	-1,581	0,400	0,707
U3	4	1	0,0	-1,451	0,400	0,649
U4	4	1	1,0	-0,791	1,000	0,354
U5	4	1	1,0	-0,816	1,000	0,365
U6	4	1	0,0	-1,491	0,200	0,667
U7	4	1	1,5	-0,500	1,000	0,224
M1	7	1	2,5	-0,577	1,000	0,204
M2	7	1	2,5	-0,577	1,000	0,204
M3	7	1	1,5	-0,943	0,750	0,333
M4	7	1	2,0	-0,756	1,000	0,267
M5	7	1	1,0	-1,195	0,500	0,423
M6	7	1	1,5	-0,936	0,875	0,331
M7	7	1	3,0	-0,231	1,000	0,082
M8	7	1	1,0	-1,155	0,625	0,408
M9	7	1	2,5	-0,408	1,000	0,144
M10	7	1	0,5	-1,323	0,571	0,468
M11	7	1	0,5	-1,285	0,571	0,454
M12	7	1	1,0	-1,080	0,857	0,382
M13	7	1	2,0	-0,624	1,000	0,220
M14	7	1	1,5	-0,786	0,857	0,278
M15	7	1	2,0	-0,519	0,857	0,183
M16	7	1	3,0	0,000	1,000	0,000
M17	7	1	0,5	-1,310	0,429	0,463
M18	7	1	0,5	-1,273	0,429	0,450
M19	7	1	0,0	-1,542	0,143	0,545
M20	7	1	1,5	-0,866	1,000	0,306
M21	7	1	0,0	-1,528	0,143	0,540
M22	7	1	2,0	-0,632	1,000	0,224

Gruppenvergleich
Anfängerpraktikum vs. Fortgeschrittenenpraktikum

Handlung	N(A)	N(F)	U(N(A);N(F))	Z	p (exakt, 2-seitig)	d (Pearson)
B1	8	1	3,5	-0,354	1,000	0,118
B2	8	1	0,0	-1,697	0,111	0,566
B3	8	1	1,0	-1,279	0,222	0,426
B4	8	1	0,0	-1,648	0,222	0,549
B5	8	1	4,0	0,000	1,000	0,000
B6	8	1	1,5	-1,035	0,778	0,345
B7	8	1	2,0	-0,866	1,000	0,289
B8	8	1	1,0	-1,225	0,667	0,408
B9	8	1	0,5	-1,449	0,222	0,483
B10	8	1	1,0	-1,299	0,444	0,433
M1	14	1	2,5	-1,256	0,333	0,324
M2	14	1	5,5	-0,497	1,000	0,128
M3	14	1	5,0	-0,598	1,000	0,154
M4	14	1	3,0	-1,109	0,333	0,286
M5	14	1	4,0	-0,776	1,000	0,200
M6	14	1	1,5	-1,315	0,467	0,339
M7	14	1	5,0	-0,498	1,000	0,129
M8	14	1	4,0	-0,793	0,867	0,205

Gruppenvergleich
Anfängerpraktikum vs. Sonstige Praktika

Handlung	N(A)	N(S)	U(N(A); N(S))	Z	p (exakt, 2-seitig)	d (Pearson)
I1	14	1	7,000	0,000	1,000	0,000
I2	14	1	6,000	-0,299	1,000	0,077
I3	14	1	1,000	-1,468	0,267	0,379
I4	14	1	5,000	-0,598	1,000	0,154
I5	14	1	3,500	-0,856	0,667	0,221
I6	14	1	2,000	-1,224	0,600	0,316
I7	12	1	5,500	-0,289	1,000	0,080
I8	12	1	1,000	-1,472	0,462	0,408
I9	12	1	3,500	-0,769	1,000	0,213
I10	12	1	4,000	-0,667	1,000	0,185
I11	12	1	1,500	-1,631	0,231	0,452
I12	12	1	3,000	-0,879	0,769	0,244
S1	9	1	0,000	-1,671	0,100	0,528
S2	9	1	0,000	-1,638	0,200	0,518
S3	9	1	3,000	-0,565	1,000	0,179
S4	9	1	0,500	-1,581	0,200	0,500
S5	9	1	1,000	-1,257	0,500	0,397
S6	9	1	3,000	-0,655	1,000	0,207
S7	9	1	0,500	-1,437	0,400	0,454
S8	9	1	4,500	0,000	1,000	0,000
S9	9	1	4,000	-0,333	1,000	0,105
S10	8	1	4,000	0,000	1,000	0,000
S11	8	1	3,000	-0,433	1,000	0,144
S12	8	1	0,000	-1,852	0,111	0,617
S13	8	1	3,500	-0,354	1,000	0,118
S14	8	1	0,000	-1,732	0,111	0,577
S15	8	1	3,500	-0,354	1,000	0,118
S16	8	1	0,000	-1,633	0,111	0,544
S17	8	1	3,000	-0,530	1,000	0,177
S18	8	1	3,500	-0,354	1,000	0,118
S19	8	1	1,500	-1,066	0,444	0,355
S20	8	1	1,000	-1,208	0,444	0,403
S21	8	1	0,000	-1,633	0,111	0,544
S22	8	1	0,500	-1,397	0,444	0,466
S23	8	1	1,500	-1,061	0,556	0,354
S24	8	1	3,500	-0,354	1,000	0,118
A1	14	4	20,000	-1,171	0,524	0,276
A2	14	4	16,000	-1,340	0,227	0,316
A3	14	4	24,000	-0,452	0,690	0,107
A4	14	4	24,000	-0,510	0,856	0,120
A5	14	4	18,500	-1,287	0,380	0,303
A6	14	4	15,500	-1,490	0,160	0,351
A7	14	4	22,000	-0,986	0,554	0,232
E1	7	1	0,500	-1,333	0,500	0,471
E2	7	1	2,500	-0,468	1,000	0,165
E3	7	1	0,500	-1,414	0,500	0,500
E4	7	1	0,500	-1,414	0,500	0,500
E5	7	1	1,500	-0,943	0,750	0,333
E6	7	1	1,500	-0,943	0,750	0,333
E7	7	1	2,500	-0,577	1,000	0,204
U1	8	1	3,000	-0,414	1,000	0,138

Fortsetzung Gruppenvergleich
Anfängerpraktikum vs. Sonstige Praktika

Handlung	N(A)	N(S)	U(N(A); N(S))	Z	p (exakt, 2-seitig)	d (Pearson)
U2	8	1	3,000	-0,433	1,000	0,144
U3	8	1	2,000	-0,824	0,556	0,275
U4	8	1	2,500	-0,636	1,000	0,212
U5	8	1	3,000	-0,433	1,000	0,144
U6	8	1	3,500	-0,204	1,000	0,068
U7	8	1	3,000	-0,535	1,000	0,178
M1	14	4	27,500	-0,067	1,000	0,160
M2	14	4	27,500	-0,073	1,000	0,170
M3	14	4	21,000	-0,893	0,439	0,210
M4	14	4	22,000	-0,763	0,504	0,180
M5	14	4	19,000	-1,052	0,405	0,248
M6	14	4	26,000	-0,220	0,857	0,152
M7	14	4	23,000	-0,561	0,695	0,132
M8	14	4	26,000	-0,236	1,000	0,156
M9	14	4	12,000	-0,553	1,000	0,130
M10	14	2	10,000	-0,673	0,675	0,159
M11	14	2	8,000	-0,988	0,542	0,233
M12	14	2	14,000	-0,546	1,000	0,300
M13	14	2	8,500	-1,153	0,150	0,272
M14	14	2	8,000	-1,014	0,367	0,239
M15	14	2	8,000	-0,995	0,458	0,235
M16	14	2	9,000	-0,987	0,542	0,233
M17	14	2	11,000	-0,501	0,658	0,118
M18	14	2	3,000	-1,802	0,108	0,425
M19	14	2	4,000	-1,657	0,158	0,391
M20	14	2	9,000	-0,835	0,667	0,197
M21	14	2	13,000	-0,167	0,925	0,139
M22	14	2	8,000	-1,117	0,500	0,263

A.6.2. Expertenrating - Ergebnisse

Vergleich
Expert:innen- vs. Entwicklerin-Rating

	Expert:innen				Entwick-lerin	Vergleich	
Handlung	N	MW	SD	Mdn.	Stufe	MW	Mdn.
I1	15	2,0	0,8	2	2	0,0	0
I2	15	3,1	0,5	3	3	-0,1	0
I3	15	2,7	0,9	3	3	0,3	0
I4	15	3,7	0,6	4	4	0,3	0
I5	15	2,7	0,9	3	2	-0,7	-1
I6	15	1,0	0,9	1	1	0,0	0
I7	13	3,9	0,3	4	4	0,1	0
I8	13	3,0	0,7	3	3	0,0	0
I9	**13**	**2,4**	**0,9**	**3**	**1**	**-1,4**	**-2**
I10	13	3,7	0,5	4	4	0,3	0
I11	13	3,6	0,9	4	4	0,4	0
I12	**13**	**0,8**	**1,0**	**0**	**2**	**1,2**	**2**
S1	10	3,0	1,2	3	4	1,0	1
S2	10	2,3	1,2	2,5	3	0,7	0,5
S3	10	2,4	0,8	2	3	0,6	1
S4	10	1,8	1,2	1	2	0,2	1
S5	**10**	**1,6**	**1,2**	**1,5**	**4**	**2,4**	**2,5**
S6	10	3,7	0,5	4	4	0,3	0
S7	10	2,5	1,1	2,5	2	-0,5	-0,5
S8	10	0,0	0,0	0	1	1,0	1
S9	10	0,1	0,3	0	0	-0,1	0
S10	9	3,0	0,5	3	4	1,0	1
S11	9	1,8	0,7	2	3	1,2	1
S12	9	1,0	0,9	1	1	0,0	0
S13	9	0,1	0,3	0	0	-0,1	0
S14	9	1,6	0,7	1	2	0,4	1
S15	9	3,9	0,3	4	4	0,1	0
S16	9	1,8	1,0	2	3	1,2	1
S17	9	0,3	0,7	0	0	-0,3	0
S18	9	3,9	0,3	4	4	0,1	0
S19	9	2,7	0,9	3	2	-0,7	-1
S20	9	2,8	1,1	3	3	0,2	0
S21	9	2,2	1,0	2	3	0,8	1
S22	9	1,4	1,1	1	2	0,6	1
S23	9	3,2	1,0	3	4	0,8	1
S24	9	0,1	0,3	0	1	0,9	1
S25	7	4,0	0,0	4	4	0,0	0
S26	7	0,4	0,5	0	1	0,6	1
S27	7	2,7	0,8	3	3	0,3	0
S28	7	1,7	0,5	2	2	0,3	0
S29	7	2,6	0,8	3	2	-0,6	-1
S30	7	0,7	0,5	1	1	0,3	0
S31	7	3,7	0,5	4	4	0,3	0
S32	7	3,0	1,2	3	3	0,0	0
T1	7	3,9	0,4	4	4	0,1	0
T2	7	2,3	1,1	2	3	0,7	1
T3	7	1,4	1,0	1	1	-0,4	0
T4	7	1,3	1,1	1	2	0,7	1
T5	7	3,1	0,7	3	4	0,9	1
T6	7	0,0	0,0	0	0	0,0	0
T7	7	3,4	1,1	4	4	0,6	0

Fortsetzung Vergleich
Expert:innen- vs. Entwicklerin-Rating

	Expert:innen				Entwick-lerin	Vergleich	
Handlung	N	MW	SD	Mdn.	Stufe	MW	Mdn.
T8	7	3,4	0,5	3	4	0,6	1
T9	7	2,4	0,8	3	3	0,6	0
P1	7	4,0	0,0	4	4	0,0	0
P2	7	1,1	0,7	1	2	0,9	1
P3	7	0,7	0,8	1	2	1,3	1
P4	7	3,4	0,8	4	4	0,6	0
P5	7	0,9	1,1	1	1	0,1	0
M1	19	1,4	0,7	1	1	-0,4	0
M2	19	4,7	0,5	5	4	-0,7	1
M3	19	4,6	0,7	5	5	0,4	0
M4	19	4,5	0,8	5	5	0,5	0
M5	19	4,3	0,7	4	4	-0,3	0
M6	19	2,4	1,1	2	3	0,6	-1
M7	19	3,3	0,8	3	3	-0,3	0
M8	19	4,4	0,8	5	5	0,6	0
M9	16	1,1	0,3	1	1	-0,1	0
M10	16	2,9	0,9	3	3	0,1	0
M11	16	3,8	1,1	4	4	0,3	0
M12	16	4,0	0,8	4	4	0,0	0
M13	16	4,7	0,6	5	5	0,3	0
M14	16	2,0	0,9	2	2	0,0	0
M15	16	3,1	1,5	2,5	3	-0,1	-0,5
M16	16	1,3	0,5	1	1	-0,3	0
M17	16	3,8	0,9	4	4	0,2	0
M18	16	2,4	1,3	2	2	-0,4	0
M19	16	2,6	1,0	2,5	3	0,4	-0,5
M20	16	3,9	0,9	4	4	0,1	0
M21	16	3,0	1,2	3	3	0,0	0
M22	16	1,4	0,6	1	1	-0,4	0
B1	9	3,9	0,3	4	3	-0,9	-1
B2	9	0,8	1,0	1	1	0,2	0
B3	9	0,8	1,1	0	1	0,2	1
B4	9	1,4	0,9	1	2	0,6	1
B5	9	4,0	0,0	3	2	-2,0	-1
B6	9	3,1	0,9	3	2	-2,1	-1
B7	9	0,6	0,7	0	1	0,4	1
B8	9	1,0	0,9	1	1	0,0	0
B9	9	0,8	0,8	1	1	0,2	0
B10	9	3,2	0,7	2 1	1	-2,2	-1

Bisher erschienene Bände der Reihe *„Studien zum Physik- und Chemielernen“*

ISSN 1614-8967 (vormals *Studien zum Physiklernen* ISSN 1435-5280)

1 Helmut Fischler, Jochen Peuckert (Hrsg.): Concept Mapping in fachdidaktischen Forschungsprojekten der Physik und Chemie
ISBN 978-3-89722-256-4 40.50 EUR

2 Anja Schoster: Bedeutungsentwicklungsprozesse beim Lösen algorithmischer Physikaufgaben. *Eine Fallstudie zu Lernprozessen von Schülern im Physiknachhilfeunterricht während der Bearbeitung algorithmischer Physikaufgaben*
ISBN 978-3-89722-045-4 40.50 EUR

3 Claudia von Aufschnaiter: Bedeutungsentwicklungen, Interaktionen und situatives Erleben beim Bearbeiten physikalischer Aufgaben
ISBN 978-3-89722-143-7 40.50 EUR

4 Susanne Haeberlen: Lernprozesse im Unterricht mit Wasserstromkreisen. *Eine Fallstudie in der Sekundarstufe I*
ISBN 978-3-89722-172-7 40.50 EUR

5 Kerstin Haller: Über den Zusammenhang von Handlungen und Zielen. *Eine empirische Untersuchung zu Lernprozessen im physikalischen Praktikum*
ISBN 978-3-89722-242-7 40.50 EUR

6 Michaela Horstendahl: Motivationale Orientierungen im Physikunterricht
ISBN 978-3-89722-227-4 50.00 EUR

7 Stefan Deylitz: Lernergebnisse in der Quanten-Atomphysik. *Evaluation des Bremer Unterrichtskonzepts*
ISBN 978-3-89722-291-5 40.50 EUR

8 Lorenz Hucke: Handlungsregulation und Wissenserwerb in traditionellen und computergestützten Experimenten des physikalischen Praktikums
ISBN 978-3-89722-316-5 50.00 EUR

9 Heike Theyßen: Ein Physikpraktikum für Studierende der Medizin. *Darstellung der Entwicklung und Evaluation eines adressatenspezifischen Praktikums nach dem Modell der Didaktischen Rekonstruktion*
ISBN 978-3-89722-334-9 40.50 EUR

10 Annette Schick: Der Einfluß von Interesse und anderen selbstbezogenen Kognitionen auf Handlungen im Physikunterricht. *Fallstudien zu Interessenhandlungen im Physikunterricht*
ISBN 978-3-89722-380-6 40.50 EUR

11 Roland Berger: Moderne bildgebende Verfahren der medizinischen Diagnostik. *Ein Weg zu interessanterem Physikunterricht*
ISBN 978-3-89722-445-2 40.50 EUR

12 Johannes Werner: Vom Licht zum Atom. *Ein Unterrichtskonzept zur Quantenphysik unter Nutzung des Zeigermodells*
ISBN 978-3-89722-471-1 40.50 EUR

13 Florian Sander: Verbindung von Theorie und Experiment im physikalischen Praktikum. *Eine empirische Untersuchung zum handlungsbezogenen Vorverständnis und dem Einsatz grafikorientierter Modellbildung im Praktikum*
ISBN 978-3-89722-482-7 40.50 EUR

14 Jörn Gerdes: Der Begriff der physikalischen Kompetenz. *Zur Validierung eines Konstruktes*
ISBN 978-3-89722-510-7 40.50 EUR

15 Malte Meyer-Arndt: Interaktionen im Physikpraktikum zwischen Studierenden und Betreuern. *Feldstudie zu Bedeutungsentwicklungsprozessen im physikalischen Praktikum*
ISBN 978-3-89722-541-1 40.50 EUR

16 Dietmar Höttecke: Die Natur der Naturwissenschaften historisch verstehen. *Fachdidaktische und wissenschaftshistorische Untersuchungen*
ISBN 978-3-89722-607-4 40.50 EUR

17 Gil Gabriel Mavanga: Entwicklung und Evaluation eines experimentell- und phänomenorientierten Optikcurriculums. *Untersuchung zu Schülervorstellungen in der Sekundarstufe I in Mosambik und Deutschland*
ISBN 978-3-89722-721-7 40.50 EUR

18 Meike Ute Zastrow: Interaktive Experimentieranleitungen. *Entwicklung und Evaluation eines Konzeptes zur Vorbereitung auf das Experimentieren mit Messgeräten im Physikalischen Praktikum*
ISBN 978-3-89722-802-3 40.50 EUR

19 Gunnar Friege: Wissen und Problemlösen. *Eine empirische Untersuchung des wissenszentrierten Problemlösens im Gebiet der Elektrizitätslehre auf der Grundlage des Experten-Novizen-Vergleichs*
ISBN 978-3-89722-809-2 40.50 EUR

20 Erich Starauschek: Physikunterricht nach dem Karlsruher Physikkurs. *Ergebnisse einer Evaluationsstudie*
ISBN 978-3-89722-823-8 40.50 EUR

21 Roland Paatz: Charakteristika analogiebasierten Denkens. *Vergleich von Lernprozessen in Basis- und Zielbereich*
ISBN 978-3-89722-944-0 40.50 EUR

22 Silke Mikelskis-Seifert: Die Entwicklung von Metakonzepten zur Teilchenvorstellung bei Schülern. *Untersuchung eines Unterrichts über Modelle mithilfe eines Systems multipler Repräsentationsebenen*
ISBN 978-3-8325-0013-9 40.50 EUR

23 Brunhild Landwehr: Distanzen von Lehrkräften und Studierenden des Sachunterrichts zur Physik. *Eine qualitativ-empirische Studie zu den Ursachen*
ISBN 978-3-8325-0044-3 40.50 EUR

24 Lydia Murmann: Physiklernen zu Licht, Schatten und Sehen. *Eine phänomenografische Untersuchung in der Primarstufe*
ISBN 978-3-8325-0060-3 40.50 EUR

25 Thorsten Bell: Strukturprinzipien der Selbstregulation. *Komplexe Systeme, Elementarisierungen und Lernprozessstudien für den Unterricht der Sekundarstufe II*
ISBN 978-3-8325-0134-1 40.50 EUR

26 Rainer Müller: Quantenphysik in der Schule
ISBN 978-3-8325-0186-0 40.50 EUR

27 Jutta Roth: Bedeutungsentwicklungsprozesse von Physikerinnen und Physikern in den Dimensionen Komplexität, Zeit und Inhalt
ISBN 978-3-8325-0183-9 40.50 EUR

28 Andreas Saniter: Spezifika der Verhaltensmuster fortgeschrittener Studierender der Physik
ISBN 978-3-8325-0292-8 40.50 EUR

29 Thomas Weber: Kumulatives Lernen im Physikunterricht. *Eine vergleichende Untersuchung in Unterrichtsgängen zur geometrischen Optik*
ISBN 978-3-8325-0316-1 40.50 EUR

30 Markus Rehm: Über die Chancen und Grenzen moralischer Erziehung im naturwissenschaftlichen Unterricht
ISBN 978-3-8325-0368-0 40.50 EUR

31 Marion Budde: Lernwirkungen in der Quanten-Atom-Physik. *Fallstudien über Resonanzen zwischen Lernangeboten und SchülerInnen-Vorstellungen*
ISBN 978-3-8325-0483-0 40.50 EUR

32 Thomas Reyer: Oberflächenmerkmale und Tiefenstrukturen im Unterricht. *Exemplarische Analysen im Physikunterricht der gymnasialen Sekundarstufe*
ISBN 978-3-8325-0488-5 40.50 EUR

33 Christoph Thomas Müller: Subjektive Theorien und handlungsleitende Kognitionen von Lehrern als Determinanten schulischer Lehr-Lern-Prozesse im Physikunterricht
ISBN 978-3-8325-0543-1 40.50 EUR

34 Gabriela Jonas-Ahrend: Physiklehrervorstellungen zum Experiment im Physikunterricht
ISBN 978-3-8325-0576-9 40.50 EUR

35 Dimitrios Stavrou: Das Zusammenspiel von Zufall und Gesetzmäßigkeiten in der nichtlinearen Dynamik. *Didaktische Analyse und Lernprozesse*
ISBN 978-3-8325-0609-4 40.50 EUR

36 Katrin Engeln: Schülerlabors: authentische, aktivierende Lernumgebungen als Möglichkeit, Interesse an Naturwissenschaften und Technik zu wecken
ISBN 978-3-8325-0689-6 40.50 EUR

37 Susann Hartmann: Erklärungsvielfalt
ISBN 978-3-8325-0730-5 40.50 EUR

38 Knut Neumann: Didaktische Rekonstruktion eines physikalischen Praktikums für Physiker
ISBN 978-3-8325-0762-6 40.50 EUR

39 Michael Späth: Kontextbedingungen für Physikunterricht an der Hauptschule. *Möglichkeiten und Ansatzpunkte für einen fachübergreifenden, handlungsorientierten und berufsorientierten Unterricht*
ISBN 978-3-8325-0827-2 40.50 EUR

40 Jörg Hirsch: Interesse, Handlungen und situatives Erleben von Schülerinnen und Schülern beim Bearbeiten physikalischer Aufgaben
ISBN 978-3-8325-0875-3 40.50 EUR

41 Monika Hüther: Evaluation einer hypermedialen Lernumgebung zum Thema Gasgesetze. *Eine Studie im Rahmen des Physikpraktikums für Studierende der Medizin*
ISBN 978-3-8325-0911-8 40.50 EUR

42 Maike Tesch: Das Experiment im Physikunterricht. *Didaktische Konzepte und Ergebnisse einer Videostudie*
ISBN 978-3-8325-0975-0 40.50 EUR

43 Nina Nicolai: Skriptgeleitete Eltern-Kind-Interaktion bei Chemiehausaufgaben. *Eine Evaluationsstudie im Themenbereich Säure-Base*
ISBN 978-3-8325-1013-8 40.50 EUR

44 Antje Leisner: Entwicklung von Modellkompetenz im Physikunterricht
ISBN 978-3-8325-1020-6 40.50 EUR

45 Stefan Rumann: Evaluation einer Interventionsstudie zur Säure-Base-Thematik
ISBN 978-3-8325-1027-5 40.50 EUR

46 Thomas Wilhelm: Konzeption und Evaluation eines Kinematik/Dynamik-Lehrgangs zur Veränderung von Schülervorstellungen mit Hilfe dynamisch ikonischer Repräsentationen und graphischer Modellbildung – mit CD-ROM
ISBN 978-3-8325-1046-6 45.50 EUR

47 Andrea Maier-Richter: Computerunterstütztes Lernen mit Lösungsbeispielen in der Chemie. *Eine Evaluationsstudie im Themenbereich Löslichkeit*
ISBN 978-3-8325-1046-6 40.50 EUR

48 Jochen Peuckert: Stabilität und Ausprägung kognitiver Strukturen zum Atombegriff
ISBN 978-3-8325-1104-3 40.50 EUR

49 Maik Walpuski: Optimierung von experimenteller Kleingruppenarbeit durch Strukturierungshilfen und Feedback
ISBN 978-3-8325-1184-5 40.50 EUR

50 Helmut Fischler, Christiane S. Reiners (Hrsg.): Die Teilchenstruktur der Materie im Physik- und Chemieunterricht
ISBN 978-3-8325-1225-5 34.90 EUR

51 Claudia Eysel: Interdisziplinäres Lehren und Lernen in der Lehrerbildung. *Eine empirische Studie zum Kompetenzerwerb in einer komplexen Lernumgebung*
ISBN 978-3-8325-1238-5 40.50 EUR

52 Johannes Günther: Lehrerfortbildung über die Natur der Naturwissenschaften. *Studien über das Wissenschaftsverständnis von Grundschullehrkräften*
ISBN 978-3-8325-1287-3 40.50 EUR

53 Christoph Neugebauer: Lernen mit Simulationen und der Einfluss auf das Problemlösen in der Physik
ISBN 978-3-8325-1300-9 40.50 EUR

54 Andreas Schnirch: Gendergerechte Interessen- und Motivationsförderung im Kontext naturwissenschaftlicher Grundbildung. *Konzeption, Entwicklung und Evaluation einer multimedial unterstützten Lernumgebung*
ISBN 978-3-8325-1334-4 40.50 EUR

55 Hilde Köster: Freies Explorieren und Experimentieren. *Eine Untersuchung zur selbstbestimmten Gewinnung von Erfahrungen mit physikalischen Phänomenen im Sachunterricht*
ISBN 978-3-8325-1348-1 40.50 EUR

56 Eva Heran-Dörr: Entwicklung und Evaluation einer Lehrerfortbildung zur Förderung der physikdidaktischen Kompetenz von Sachunterrichtslehrkräften
ISBN 978-3-8325-1377-1 40.50 EUR

57 Agnes Szabone Varnai: Unterstützung des Problemlösens in Physik durch den Einsatz von Simulationen und die Vorgabe eines strukturierten Kooperationsformats
ISBN 978-3-8325-1403-7 40.50 EUR

58 Johannes Rethfeld: Aufgabenbasierte Lernprozesse in selbstorganisationsoffenem Unterricht der Sekundarstufe I zum Themengebiet ELEKTROSTATIK. *Eine Feldstudie in vier 10. Klassen zu einer kartenbasierten Lernumgebung mit Aufgaben aus der Elektrostatik*
ISBN 978-3-8325-1416-7 40.50 EUR

59 Christian Henke: Experimentell-naturwissenschaftliche Arbeitsweisen in der Oberstufe. *Untersuchung am Beispiel des HIGHSEA-Projekts in Bremerhaven*
ISBN 978-3-8325-1515-7 40.50 EUR

60 Lutz Kasper: Diskursiv-narrative Elemente für den Physikunterricht. *Entwicklung und Evaluation einer multimedialen Lernumgebung zum Erdmagnetismus*
ISBN 978-3-8325-1537-9 40.50 EUR

61 Thorid Rabe: Textgestaltung und Aufforderung zu Selbsterklärungen beim Physiklernen mit Multimedia
ISBN 978-3-8325-1539-3 40.50 EUR

62 Ina Glemnitz: Vertikale Vernetzung im Chemieunterricht. *Ein Vergleich von traditionellem Unterricht mit Unterricht nach Chemie im Kontext*
ISBN 978-3-8325-1628-4 40.50 EUR

63 Erik Einhaus: Schülerkompetenzen im Bereich Wärmelehre. *Entwicklung eines Testinstruments zur Überprüfung und Weiterentwicklung eines normativen Modells fachbezogener Kompetenzen*
ISBN 978-3-8325-1630-7 40.50 EUR

64 Jasmin Neuroth: Concept Mapping als Lernstrategie. *Eine Interventionsstudie zum Chemielernen aus Texten*
ISBN 978-3-8325-1659-8 40.50 EUR

65 Hans Gerd Hegeler-Burkhart: Zur Kommunikation von Hauptschülerinnen und Hauptschülern in einem handlungsorientierten und fächerübergreifenden Unterricht mit physikalischen und technischen Inhalten
ISBN 978-3-8325-1667-3 40.50 EUR

66 Karsten Rincke: Sprachentwicklung und Fachlernen im Mechanikunterricht. *Sprache und Kommunikation bei der Einführung in den Kraftbegriff*
ISBN 978-3-8325-1699-4 40.50 EUR

67 Nina Strehle: Das Ion im Chemieunterricht. *Alternative Schülervorstellungen und curriculare Konsequenzen*
ISBN 978-3-8325-1710-6 40.50 EUR

68 Martin Hopf: Problemorientierte Schülerexperimente
ISBN 978-3-8325-1711-3 40.50 EUR

69 Anne Beerenwinkel: Fostering conceptual change in chemistry classes using expository texts
ISBN 978-3-8325-1721-2 40.50 EUR

70 Roland Berger: Das Gruppenpuzzle im Physikunterricht der Sekundarstufe II. *Eine empirische Untersuchung auf der Grundlage der Selbstbestimmungstheorie der Motivation*
ISBN 978-3-8325-1732-8 40.50 EUR

71 Giuseppe Colicchia: Physikunterricht im Kontext von Medizin und Biologie. *Entwicklung und Erprobung von Unterrichtseinheiten*
ISBN 978-3-8325-1746-5 40.50 EUR

72 Sandra Winheller: Geschlechtsspezifische Auswirkungen der Lehrer-Schüler-Interaktion im Chemieanfangsunterricht
ISBN 978-3-8325-1757-1 40.50 EUR

73 Isabel Wahser: Training von naturwissenschaftlichen Arbeitsweisen zur Unterstützung experimenteller Kleingruppenarbeit im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-1815-8 40.50 EUR

74 Claus Brell: Lernmedien und Lernerfolg - reale und virtuelle Materialien im Physikunterricht. *Empirische Untersuchungen in achten Klassen an Gymnasien (Laborstudie) zum Computereinsatz mit Simulation und IBE*
ISBN 978-3-8325-1829-5 40.50 EUR

75 Rainer Wackermann: Überprüfung der Wirksamkeit eines Basismodell-Trainings für Physiklehrer
ISBN 978-3-8325-1882-0 40.50 EUR

76 Oliver Tepner: Effektivität von Aufgaben im Chemieunterricht der Sekundarstufe I
ISBN 978-3-8325-1919-3 40.50 EUR

77 Claudia Geyer: Museums- und Science-Center-Besuche im naturwissenschaftlichen Unterricht aus einer motivationalen Perspektive. *Die Sicht von Lehrkräften und Schülerinnen und Schülern*
ISBN 978-3-8325-1922-3 40.50 EUR

78 Tobias Leonhard: Professionalisierung in der Lehrerbildung. *Eine explorative Studie zur Entwicklung professioneller Kompetenzen in der Lehrererstausbildung*
ISBN 978-3-8325-1924-7 40.50 EUR

79 Alexander Kauertz: Schwierigkeitserzeugende Merkmale physikalischer Leistungstestaufgaben
ISBN 978-3-8325-1925-4 40.50 EUR

80 Regina Hübinger: Schüler auf Weltreise. *Entwicklung und Evaluation von Lehr-/ Lernmaterialien zur Förderung experimentell-naturwissenschaftlicher Kompetenzen für die Jahrgangsstufen 5 und 6*
ISBN 978-3-8325-1932-2 40.50 EUR

81 Christine Waltner: Physik lernen im Deutschen Museum
ISBN 978-3-8325-1933-9 40.50 EUR

82 Torsten Fischer: Handlungsmuster von Physiklehrkräften beim Einsatz neuer Medien. *Fallstudien zur Unterrichtspraxis*
ISBN 978-3-8325-1948-3 42.00 EUR

83 Corinna Kieren: Chemiehausaufgaben in der Sekundarstufe I des Gymnasiums. *Fragebogenerhebung zur gegenwärtigen Praxis und Entwicklung eines optimierten Hausaufgabendesigns im Themenbereich Säure-Base*
978-3-8325-1975-9 37.00 EUR

84 Marco Thiele: Modelle der Thermohalinen Zirkulation im Unterricht. *Eine empirische Studie zur Förderung des Modellverständnisses*
ISBN 978-3-8325-1982-7 40.50 EUR

85 Bernd Zinn: Physik lernen, um Physik zu lehren. *Eine Möglichkeit für interessanteren Physikunterricht*
ISBN 978-3-8325-1995-7 39.50 EUR

86 Esther Klaes: Außerschulische Lernorte im naturwissenschaftlichen Unterricht. *Die Perspektive der Lehrkraft*
ISBN 978-3-8325-2006-9 43.00 EUR

87 Marita Schmidt: Kompetenzmodellierung und -diagnostik im Themengebiet Energie der Sekundarstufe I. *Entwicklung und Erprobung eines Testinventars*
ISBN 978-3-8325-2024-3 37.00 EUR

88 Gudrun Franke-Braun: Aufgaben mit gestuften Lernhilfen. *Ein Aufgabenformat zur Förderung der sachbezogenen Kommunikation und Lernleistung für den naturwissenschaftlichen Unterricht*
ISBN 978-3-8325-2026-7 38.00 EUR

89 Silke Klos: Kompetenzförderung im naturwissenschaftlichen Anfangsunterricht. *Der Einfluss eines integrierten Unterrichtskonzepts*
ISBN 978-3-8325-2133-2 37.00 EUR

90 Ulrike Elisabeth Burkard: Quantenphysik in der Schule. *Bestandsaufnahme, Perspektiven und Weiterentwicklungsmöglichkeiten durch die Implementation eines Medienservers*
ISBN 978-3-8325-2215-5 43.00 EUR

91 Ulrike Gromadecki: Argumente in physikalischen Kontexten. *Welche Geltungsgründe halten Physikanfänger für überzeugend?*
ISBN 978-3-8325-2250-6 41.50 EUR

92 Jürgen Bruns: Auf dem Weg zur Förderung naturwissenschaftsspezifischer Vorstellungen von zukünftigen Chemie-Lehrenden
ISBN 978-3-8325-2257-5 43.50 EUR

93 Cornelius Marsch: Räumliche Atomvorstellung. *Entwicklung und Erprobung eines Unterrichtskonzeptes mit Hilfe des Computers*
ISBN 978-3-8325-2293-3 82.50 EUR

94 Maja Brückmann: Sachstrukturen im Physikunterricht. *Ergebnisse einer Videostudie*
ISBN 978-3-8325-2272-8 39.50 EUR

95 Sabine Fechner: Effects of Context-oriented Learning on Student Interest and Achievement in Chemistry Education
ISBN 978-3-8325-2343-5 36.50 EUR

96 Clemens Nagel: eLearning im Physikalischen Anfängerpraktikum
ISBN 978-3-8325-2355-8 39.50 EUR

97 Josef Riese: Professionelles Wissen und professionelle Handlungskompetenz von (angehenden) Physiklehrkräften
ISBN 978-3-8325-2376-3 39.00 EUR

98 Sascha Bernholt: Kompetenzmodellierung in der Chemie. *Theoretische und empirische Reflexion am Beispiel des Modells hierarchischer Komplexität*
ISBN 978-3-8325-2447-0 40.00 EUR

99 Holger Christoph Stawitz: Auswirkung unterschiedlicher Aufgabenprofile auf die Schülerleistung. *Vergleich von Naturwissenschafts- und Problemlöseaufgaben der PISA 2003-Studie*
ISBN 978-3-8325-2451-7 37.50 EUR

100 Hans Ernst Fischer, Elke Sumfleth (Hrsg.): nwu-essen – 10 Jahre Essener Forschung zum naturwissenschaftlichen Unterricht
ISBN 978-3-8325-3331-1 40.00 EUR

101 Hendrik Härtig: Sachstrukturen von Physikschulbüchern als Grundlage zur Bestimmung der Inhaltsvalidität eines Tests
ISBN 978-3-8325-2512-5 34.00 EUR

102 Thomas Grüß-Niehaus: Zum Verständnis des Löslichkeitskonzeptes im Chemieunterricht. *Der Effekt von Methoden progressiver und kollaborativer Reflexion*
ISBN 978-3-8325-2537-8 40.50 EUR

103 Patrick Bronner: Quantenoptische Experimente als Grundlage eines Curriculums zur Quantenphysik des Photons
ISBN 978-3-8325-2540-8 36.00 EUR

104 Adrian Voßkühler: Blickbewegungsmessung an Versuchsaufbauten. *Studien zur Wahrnehmung, Verarbeitung und Usability von physikbezogenen Experimenten am Bildschirm und in der Realität*
ISBN 978-3-8325-2548-4 47.50 EUR

105 Verena Tobias: Newton'sche Mechanik im Anfangsunterricht. *Die Wirksamkeit einer Einführung über die zweidimensionale Dynamik auf das Lehren und Lernen*
ISBN 978-3-8325-2558-3 54.00 EUR

106 Christian Rogge: Entwicklung physikalischer Konzepte in aufgabenbasierten Lernumgebungen
ISBN 978-3-8325-2574-3 45.00 EUR

107 Mathias Ropohl: Modellierung von Schülerkompetenzen im Basiskonzept Chemische Reaktion. *Entwicklung und Analyse von Testaufgaben*
ISBN 978-3-8325-2609-2 36.50 EUR

108 Christoph Kulgemeyer: Physikalische Kommunikationskompetenz. *Modellierung und Diagnostik*
ISBN 978-3-8325-2674-0 44.50 EUR

109 Jennifer Olszewski: The Impact of Physics Teachers' Pedagogical Content Knowledge on Teacher Actions and Student Outcomes
ISBN 978-3-8325-2680-1 33.50 EUR

110 Annika Ohle: Primary School Teachers' Content Knowledge in Physics and its Impact on Teaching and Students' Achievement
ISBN 978-3-8325-2684-9 36.50 EUR

111 Susanne Mannel: Assessing scientific inquiry. *Development and evaluation of a test for the low-performing stage*
ISBN 978-3-8325-2761-7 40.00 EUR

112 Michael Plomer: Physik physiologisch passend praktiziert. *Eine Studie zur Lernwirksamkeit von traditionellen und adressatenspezifischen Physikpraktika für die Physiologie*
ISBN 978-3-8325-2804-1 34.50 EUR

113 Alexandra Schulz: Experimentierspezifische Qualitätsmerkmale im Chemieunterricht. *Eine Videostudie*
ISBN 978-3-8325-2817-1 40.00 EUR

114 Franz Boczianowski: Eine empirische Untersuchung zu Vektoren im Physikunterricht der Mittelstufe
ISBN 978-3-8325-2843-0 39.50 EUR

115 Maria Ploog: Internetbasiertes Lernen durch Textproduktion im Fach Physik
ISBN 978-3-8325-2853-9 39.50 EUR

116 Anja Dhein: Lernen in Explorier- und Experimentiersituationen. *Eine explorative Studie zu Bedeutungsentwicklungsprozessen bei Kindern im Alter zwischen 4 und 6 Jahren*
ISBN 978-3-8325-2859-1 45.50 EUR

117 Irene Neumann: Beyond Physics Content Knowledge. *Modeling Competence Regarding Nature of Scientific Inquiry and Nature of Scientific Knowledge*
ISBN 978-3-8325-2880-5 37.00 EUR

118 Markus Emden: Prozessorientierte Leistungsmessung des naturwissenschaftlich-experimentellen Arbeitens. *Eine vergleichende Studie zu Diagnoseinstrumenten zu Beginn der Sekundarstufe I*
ISBN 978-3-8325-2867-6 38.00 EUR

119 Birgit Hofmann: Analyse von Blickbewegungen von Schülern beim Lesen von physikbezogenen Texten mit Bildern. *Eye Tracking als Methodenwerkzeug in der physikdidaktischen Forschung*
ISBN 978-3-8325-2925-3 59.00 EUR

120 Rebecca Knobloch: Analyse der fachinhaltlichen Qualität von Schüleräußerungen und deren Einfluss auf den Lernerfolg. *Eine Videostudie zu kooperativer Kleingruppenarbeit*
ISBN 978-3-8325-3006-8 36.50 EUR

121 Julia Hostenbach: Entwicklung und Prüfung eines Modells zur Beschreibung der Bewertungskompetenz im Chemieunterricht
ISBN 978-3-8325-3013-6 38.00 EUR

122 Anna Windt: Naturwissenschaftliches Experimentieren im Elementarbereich. *Evaluation verschiedener Lernsituationen*
ISBN 978-3-8325-3020-4 43.50 EUR

123 Eva Kölbach: Kontexteinflüsse beim Lernen mit Lösungsbeispielen
ISBN 978-3-8325-3025-9 38.50 EUR

124 Anna Lau: Passung und vertikale Vernetzung im Chemie- und Physikunterricht
ISBN 978-3-8325-3021-1 36.00 EUR

125 Jan Lamprecht: Ausbildungswege und Komponenten professioneller Handlungskompetenz. *Vergleich von Quereinsteigern mit Lehramtsabsolventen für Gymnasien im Fach Physik*
ISBN 978-3-8325-3035-8 38.50 EUR

126 Ulrike Böhm: Förderung von Verstehensprozessen unter Einsatz von Modellen
ISBN 978-3-8325-3042-6 41.00 EUR

127 Sabrina Dollny: Entwicklung und Evaluation eines Testinstruments zur Erfassung des fachspezifischen Professionswissens von Chemielehrkräften
ISBN 978-3-8325-3046-4 37.00 EUR

128 Monika Zimmermann: Naturwissenschaftliche Bildung im Kindergarten. *Eine integrative Längsschnittstudie zur Kompetenzentwicklung von Erzieherinnen*
ISBN 978-3-8325-3053-2 54.00 EUR

129 Ulf Saballus: Über das Schlussfolgern von Schülerinnen und Schülern zu öffentlichen Kontroversen mit naturwissenschaftlichem Hintergrund. *Eine Fallstudie*
ISBN 978-3-8325-3086-0 39.50 EUR

130 Olaf Krey: Zur Rolle der Mathematik in der Physik. *Wissenschaftstheoretische Aspekte und Vorstellungen Physiklernender*
ISBN 978-3-8325-3101-0 46.00 EUR

131 Angelika Wolf: Zusammenhänge zwischen der Eigenständigkeit im Physikunterricht, der Motivation, den Grundbedürfnissen und dem Lernerfolg von Schülern
ISBN 978-3-8325-3161-4 45.00 EUR

132 Johannes Börlin: Das Experiment als Lerngelegenheit. *Vom interkulturellen Vergleich des Physikunterrichts zu Merkmalen seiner Qualität*
ISBN 978-3-8325-3170-6 45.00 EUR

133 Olaf Uhden: Mathematisches Denken im Physikunterricht. *Theorieentwicklung und Problemanalyse*
ISBN 978-3-8325-3170-6 45.00 EUR

134 Christoph Gut: Modellierung und Messung experimenteller Kompetenz. *Analyse eines large-scale Experimentiertests*
ISBN 978-3-8325-3213-0 40.00 EUR

135 Antonio Rueda: Lernen mit ExploMultimedial in kolumbianischen Schulen. *Analyse von kurzzeitigen Lernprozessen und der Motivation beim länderübergreifenden Einsatz einer deutschen computergestützten multimedialen Lernumgebung für den naturwissenschaftlichen Unterricht*
ISBN 978-3-8325-3218-5 45.50 EUR

136 Krisztina Berger: Bilder, Animationen und Notizen. *Empirische Untersuchung zur Wirkung einfacher visueller Repräsentationen und Notizen auf den Wissenserwerb in der Optik*
ISBN 978-3-8325-3238-3 41.50 EUR

137 Antony Crossley: Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher physikalischer Konzepte auf den Wissenserwerb in der Thermodynamik der Sekundarstufe I
ISBN 978-3-8325-3275-8 40.00 EUR

138 Tobias Viering: Entwicklung physikalischer Kompetenz in der Sekundarstufe I. *Validierung eines Kompetenzentwicklungsmodells für das Energiekonzept im Bereich Fachwissen*
ISBN 978-3-8325-3277-2 37.00 EUR

139 Nico Schreiber: Diagnostik experimenteller Kompetenz. *Validierung technologiegestützter Testverfahren im Rahmen eines Kompetenzstrukturmodells*
ISBN 978-3-8325-3284-0 39.00 EUR

140 Sarah Hundertmark: Einblicke in kollaborative Lernprozesse. *Eine Fallstudie zur reflektierenden Zusammenarbeit unterstützt durch die Methoden Concept Mapping und Lernbegleitbogen*
ISBN 978-3-8325-3251-2 43.00 EUR

141 Ronny Scherer: Analyse der Struktur, Messinvarianz und Ausprägung komplexer Problemlösekompetenz im Fach Chemie. *Eine Querschnittstudie in der Sekundarstufe I und am Übergang zur Sekundarstufe II*
ISBN 978-3-8325-3312-0 43.00 EUR

142 Patricia Heitmann: Bewertungskompetenz im Rahmen naturwissenschaftlicher Problemlöseprozesse. *Modellierung und Diagnose der Kompetenzen Bewertung und analytisches Problemlösen für das Fach Chemie*
ISBN 978-3-8325-3314-4 37.00 EUR

143 Jan Fleischhauer: Wissenschaftliches Argumentieren und Entwicklung von Konzepten beim Lernen von Physik
ISBN 978-3-8325-3325-0 35.00 EUR

144 Nermin Özcan: Zum Einfluss der Fachsprache auf die Leistung im Fach Chemie. *Eine Förderstudie zur Fachsprache im Chemieunterricht*
ISBN 978-3-8325-3328-1 36.50 EUR

145 Helena van Vorst: Kontextmerkmale und ihr Einfluss auf das Schülerinteresse im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-3321-2 38.50 EUR

146 Janine Cappell: Fachspezifische Diagnosekompetenz angehender Physiklehrkräfte in der ersten Ausbildungsphase
ISBN 978-3-8325-3356-4 38.50 EUR

147 Susanne Bley: Förderung von Transferprozessen im Chemieunterricht
ISBN 978-3-8325-3407-3 40.50 EUR

148 Cathrin Blaes: Die übungsgestützte Lehrerpräsentation im Chemieunterricht der Sekundarstufe I. *Evaluation der Effektivität*
ISBN 978-3-8325-3409-7 43.50 EUR

149 Julia Suckut: Die Wirksamkeit von piko-OWL als Lehrerfortbildung. Eine Evaluation zum Projekt *Physik im Kontext* in Fallstudien
ISBN 978-3-8325-3440-0 45.00 EUR

150 Alexandra Dorschu: Die Wirkung von Kontexten in Physikkompetenztestaufgaben
ISBN 978-3-8325-3446-2 37.00 EUR

151 Jochen Scheid: Multiple Repräsentationen, Verständnis physikalischer Experimente und kognitive Aktivierung: *Ein Beitrag zur Entwicklung der Aufgabenkultur*
ISBN 978-3-8325-3449-3 49.00 EUR

152 Tim Plasa: Die Wahrnehmung von Schülerlaboren und Schülerforschungszentren
ISBN 978-3-8325-3483-7 35.50 EUR

153 Felix Schoppmeier: Physikkompetenz in der gymnasialen Oberstufe.*Entwicklung und Validierung eines Kompetenzstrukturmodells für den Kompetenzbereich Umgang mit Fachwissen*
ISBN 978-3-8325-3502-5 36.00 EUR

154 Katharina Groß: Experimente alternativ dokumentieren. *Eine qualitative Studie zur Förderung der Diagnose- und Differenzierungskompetenz in der Chemielehrerbildung*
ISBN 978-3-8325-3508-7 43.50 EUR

155 Barbara Hank: Konzeptwandelprozesse im Anfangsunterricht Chemie. *Eine quasiexperimentelle Längsschnittstudie*
ISBN 978-3-8325-3519-3 38.50 EUR

156 Katja Freyer: Zum Einfluss von Studieneingangsvoraussetzungen auf den Studienerfolg Erstsemesterstudierender im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-3544-5 38.00 EUR

157 Alexander Rachel: Auswirkungen instruktionaler Hilfen bei der Einführung des (Ferro-)Magnetismus. *Eine Vergleichsstudie in der Primar- und Sekundarstufe*
ISBN 978-3-8325-3548-3 43.50 EUR

158 Sebastian Ritter: Einfluss des Lerninhalts Nanogrößeneffekte auf Teilchen- und Teilchenmodellvorstellungen von Schülerinnen und Schülern
ISBN 978-3-8325-3558-2 36.00 EUR

159 Andrea Harbach: Problemorientierung und Vernetzung in kontextbasierten Lernaufgaben
ISBN 978-3-8325-3564-3 39.00 EUR

160 David Obst: Interaktive Tafeln im Physikunterricht. *Entwicklung und Evaluation einer Lehrerfortbildung*
ISBN 978-3-8325-3582-7 40.50 EUR

161 Sophie Kirschner: Modellierung und Analyse des Professionswissens von Physiklehrkräften
ISBN 978-3-8325-3601-5 35.00 EUR

162 Katja Stief: Selbstregulationsprozesse und Hausaufgabenmotivation im Chemieunterricht
ISBN 978-3-8325-3631-2 34.00 EUR

163 Nicola Meschede: Professionelle Wahrnehmung der inhaltlichen Strukturierung im naturwissenschaftlichen Grundschulunterricht. *Theoretische Beschreibung und empirische Erfassung*
ISBN 978-3-8325-3668-8 37.00 EUR

164 Johannes Maximilian Barth: Experimentieren im Physikunterricht der gymnasialen Oberstufe. *Eine Rekonstruktion übergeordneter Einbettungsstrategien*
ISBN 978-3-8325-3681-7 39.00 EUR

165 Sandra Lein: Das Betriebspraktikum in der Lehrerbildung. *Eine Untersuchung zur Förderung der Wissenschafts- und Technikbildung im allgemeinbildenden Unterricht*
ISBN 978-3-8325-3698-5 40.00 EUR

166 Veranika Maiseyenka: Modellbasiertes Experimentieren im Unterricht. *Praxistauglichkeit und Lernwirkungen*
ISBN 978-3-8325-3708-1 38.00 EUR

167 Christoph Stolzenberger: Der Einfluss der didaktischen Lernumgebung auf das Erreichen geforderter Bildungsziele am Beispiel der W- und P-Seminare im Fach Physik
ISBN 978-3-8325-3708-1 38.00 EUR

168 Pia Altenburger: Mehrebenenregressionsanalysen zum Physiklernen im Sachunterricht der Primarstufe. *Ergebnisse einer Evaluationsstudie.*
ISBN 978-3-8325-3717-3 37.50 EUR

169 Nora Ferber: Entwicklung und Validierung eines Testinstruments zur Erfassung von Kompetenzentwicklung im Fach Chemie in der Sekundarstufe I
ISBN 978-3-8325-3727-2 39.50 EUR

170 Anita Stender: Unterrichtsplanung: Vom Wissen zum Handeln.
Theoretische Entwicklung und empirische Überprüfung des Transformationsmodells der Unterrichtsplanung
ISBN 978-3-8325-3750-0 41.50 EUR

171 Jenna Koenen: Entwicklung und Evaluation von experimentunterstützten Lösungsbeispielen zur Förderung naturwissenschaftlich-experimenteller Arbeitsweisen
ISBN 978-3-8325-3785-2 43.00 EUR

172 Teresa Henning: Empirische Untersuchung kontextorientierter Lernumgebungen in der Hochschuldidaktik. *Entwicklung und Evaluation kontextorientierter Aufgaben in der Studieneingangsphase für Fach- und Nebenfachstudierende der Physik*
ISBN 978-3-8325-3801-9 43.00 EUR

173 Alexander Pusch: Fachspezifische Instrumente zur Diagnose und individuellen Förderung von Lehramtsstudierenden der Physik
ISBN 978-3-8325-3829-3 38.00 EUR

174 Christoph Vogelsang: Validierung eines Instruments zur Erfassung der professionellen Handlungskompetenz von (angehenden) Physiklehrkräften. *Zusammenhangsanalysen zwischen Lehrerkompetenz und Lehrerperformanz*
ISBN 978-3-8325-3846-0 50.50 EUR

175 Ingo Brebeck: Selbstreguliertes Lernen in der Studieneingangsphase im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-3859-0 37.00 EUR

176 Axel Eghtessad: Merkmale und Strukturen von Professionalisierungsprozessen in der ersten und zweiten Phase der Chemielehrerbildung. *Eine empirisch-qualitative Studie mit niedersächsischen Fachleiter_innen der Sekundarstufenlehrämter*
ISBN 978-3-8325-3861-3 45.00 EUR

177 Andreas Nehring: Wissenschaftliche Denk- und Arbeitsweisen im Fach Chemie. Eine kompetenzorientierte Modell- und Testentwicklung für den Bereich der Erkenntnisgewinnung
ISBN 978-3-8325-3872-9 39.50 EUR

178 Maike Schmidt: Professionswissen von Sachunterrichtslehrkräften. Zusammenhangsanalyse zur Wirkung von Ausbildungshintergrund und Unterrichtserfahrung auf das fachspezifische Professionswissen im Unterrichtsinhalt „Verbrennung“
ISBN 978-3-8325-3907-8 38.50 EUR

179 Jan Winkelmann: Auswirkungen auf den Fachwissenszuwachs und auf affektive Schülermerkmale durch Schüler- und Demonstrationsexperimente im Physikunterricht
ISBN 978-3-8325-3915-3 41.00 EUR

180 Iwen Kobow: Entwicklung und Validierung eines Testinstrumentes zur Erfassung der Kommunikationskompetenz im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-3927-6 34.50 EUR

181 Yvonne Gramzow: Fachdidaktisches Wissen von Lehramtsstudierenden im Fach Physik. Modellierung und Testkonstruktion
ISBN 978-3-8325-3931-3 42.50 EUR

182 Evelin Schröter: Entwicklung der Kompetenzerwartung durch Lösen physikalischer Aufgaben einer multimedialen Lernumgebung
ISBN 978-3-8325-3975-7 54.50 EUR

183 Inga Kallweit: Effektivität des Einsatzes von Selbsteinschätzungsbögen im Chemieunterricht der Sekundarstufe I. *Individuelle Förderung durch selbstreguliertes Lernen*
ISBN 978-3-8325-3965-8 44.00 EUR

184 Andrea Schumacher: Paving the way towards authentic chemistry teaching. *A contribution to teachers' professional development*
ISBN 978-3-8325-3976-4 48.50 EUR

185 David Woitkowski: Fachliches Wissen Physik in der Hochschulausbildung. *Konzeptualisierung, Messung, Niveaubildung*
ISBN 978-3-8325-3988-7 53.00 EUR

186 Marianne Korner: Cross-Age Peer Tutoring in Physik. *Evaluation einer Unterrichtsmethode*
ISBN 978-3-8325-3979-5 38.50 EUR

187 Simone Nakoinz: Untersuchung zur Verknüpfung submikroskopischer und makroskopischer Konzepte im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-4057-9 38.50 EUR

188 Sandra Anus: Evaluation individueller Förderung im Chemieunterricht.*Adaptivität von Lerninhalten an das Vorwissen von Lernenden am Beispiel des Basiskonzeptes Chemische Reaktion*
ISBN 978-3-8325-4059-3 43.50 EUR

189 Thomas Roßbegalle: Fachdidaktische Entwicklungsforschung zum besseren Verständnis atmosphärischer Phänomene. *Treibhauseffekt, saurer Regen und stratosphärischer Ozonabbau als Kontexte zur Vermittlung von Basiskonzepten der Chemie*
ISBN 978-3-8325-4059-3 45.50 EUR

190 Kathrin Steckenmesser-Sander: Gemeinsamkeiten und Unterschiede physikbezogener Handlungs-, Denk- und Lernprozesse von Mädchen und Jungen
ISBN 978-3-8325-4066-1 38.50 EUR

191 Cornelia Geller: Lernprozessorientierte Sequenzierung des Physikunterrichts im Zusammenhang mit Fachwissenserwerb. *Eine Videostudie in Finnland, Deutschland und der Schweiz*
ISBN 978-3-8325-4082-1 35.50 EUR

192 Jan Hofmann: Untersuchung des Kompetenzaufbaus von Physiklehrkräften während einer Fortbildungsmaßnahme
ISBN 978-3-8325-4104-0 38.50 EUR

193 Andreas Dickhäuser: Chemiespezifischer Humor. *Theoriebildung, Materialentwicklung, Evaluation*
ISBN 978-3-8325-4108-8 37.00 EUR

194 Stefan Korte: Die Grenzen der Naturwissenschaft als Thema des Physikunterrichts
ISBN 978-3-8325-4112-5 57.50 EUR

195 Carolin Hülsmann: Kurswahlmotive im Fach Chemie. Eine Studie zum Wahlverhalten und Erfolg von Schülerinnen und Schülern in der gymnasialen Oberstufe
ISBN 978-3-8325-4144-6 49.00 EUR

196 Caroline Körbs: Mindeststandards im Fach Chemie am Ende der Pflichtschulzeit
ISBN 978-3-8325-4148-4 34.00 EUR

197 Andreas Vorholzer: Wie lassen sich Kompetenzen des experimentellen Denkens und Arbeitens fördern? *Eine empirische Untersuchung der Wirkung eines expliziten und eines impliziten Instruktionsansatzes*
ISBN 978-3-8325-4194-1 37.50 EUR

198 Anna Katharina Schmitt: Entwicklung und Evaluation einer Chemielehrerfortbildung zum Kompetenzbereich Erkenntnisgewinnung
ISBN 978-3-8325-4228-3 39.50 EUR

199 Christian Maurer: Strukturierung von Lehr-Lern-Sequenzen
ISBN 978-3-8325-4247-4 36.50 EUR

200 Helmut Fischler, Elke Sumfleth (Hrsg.): Professionelle Kompetenz von Lehrkräften der Chemie und Physik
ISBN 978-3-8325-4523-9 34.00 EUR

201 Simon Zander: Lehrerfortbildung zu Basismodellen und Zusammenhänge zum Fachwissen
ISBN 978-3-8325-4248-1 35.00 EUR

202 Kerstin Arndt: Experimentierkompetenz erfassen.
Analyse von Prozessen und Mustern am Beispiel von Lehramtsstudierenden der Chemie
ISBN 978-3-8325-4266-5 45.00 EUR

203 Christian Lang: Kompetenzorientierung im Rahmen experimentalchemischer Praktika
ISBN 978-3-8325-4268-9 42.50 EUR

204 Eva Cauet: Testen wir relevantes Wissen? *Zusammenhang zwischen dem Professionswissen von Physiklehrkräften und gutem und erfolgreichem Unterrichten*
ISBN 978-3-8325-4276-4 39.50 EUR

205 Patrick Löffler: Modellanwendung in Problemlöseaufgaben. *Wie wirkt Kontext?*
ISBN 978-3-8325-4303-7 35.00 EUR

206 Carina Gehlen: Kompetenzstruktur naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-4318-1 43.00 EUR

207 Lars Oettinghaus: Lehrerüberzeugungen und physikbezogenes Professionswissen. *Vergleich von Absolventinnen und Absolventen verschiedener Ausbildungswege im Physikreferendariat*
ISBN 978-3-8325-4319-8 38.50 EUR

208 Jennifer Petersen: Zum Einfluss des Merkmals Humor auf die Gesundheitsförderung im Chemieunterricht der Sekundarstufe I.
Eine Interventionsstudie zum Thema Sonnenschutz
ISBN 978-3-8325-4348-8 40.00 EUR

209 Philipp Straube: Modellierung und Erfassung von Kompetenzen naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung bei (Lehramts-) Studierenden im Fach Physik
ISBN 978-3-8325-4351-8 35.50 EUR

210 Martin Dickmann: Messung von Experimentierfähigkeiten. *Validierungsstudien zur Qualität eines computerbasierten Testverfahrens*
ISBN 978-3-8325-4356-3 41.00 EUR

211 Markus Bohlmann: Science Education. Empirie, Kulturen und Mechanismen der Didaktik der Naturwissenschaften
ISBN 978-3-8325-4377-8 44.00 EUR

212 Martin Draude: Die Kompetenz von Physiklehrkräften, Schwierigkeiten von Schülerinnen und Schülern beim eigenständigen Experimentieren zu diagnostizieren
ISBN 978-3-8325-4382-2 37.50 EUR

213 Henning Rode: Prototypen evidenzbasierten Physikunterrichts. *Zwei empirische Studien zum Einsatz von Feedback und Blackboxes in der Sekundarstufe*
ISBN 978-3-8325-4389-1 42.00 EUR

214 Jan-Henrik Kechel: Schülerschwierigkeiten beim eigenständigen Experimentieren. *Eine qualitative Studie am Beispiel einer Experimentieraufgabe zum Hooke'schen Gesetz*
ISBN 978-3-8325-4392-1 55.00 EUR

215 Katharina Fricke: Classroom Management and its Impact on Lesson Outcomes in Physics. *A multi-perspective comparison of teaching practices in primary and secondary schools*
ISBN 978-3-8325-4394-5 40.00 EUR

216 Hannes Sander: Orientierungen von Jugendlichen beim Urteilen und Entscheiden in Kontexten nachhaltiger Entwicklung. *Eine rekonstruktive Perspektive auf Bewertungskompetenz in der Didaktik der Naturwissenschaft*
ISBN 978-3-8325-4434-8 46.00 EUR

217 Inka Haak: Maßnahmen zur Unterstützung kognitiver und metakognitiver Prozesse in der Studieneingangsphase. *Eine Design-Based-Research-Studie zum universitären Lernzentrum Physiktreff*
ISBN 978-3-8325-4437-9 46.50 EUR

218 Martina Brandenburger: Was beeinflusst den Erfolg beim Problemlösen in der Physik? *Eine Untersuchung mit Studierenden*
ISBN 978-3-8325-4409-6 42.50 EUR

219 Corinna Helms: Entwicklung und Evaluation eines Trainings zur Verbesserung der Erklärqualität von Schülerinnen und Schülern im Gruppenpuzzle
ISBN 978-3-8325-4454-6 42.50 EUR

220 Viktoria Rath: Diagnostische Kompetenz von angehenden Physiklehrkräften. *Modellierung, Testinstrumentenentwicklung und Erhebung der Performanz bei der Diagnose von Schülervorstellungen in der Mechanik*
ISBN 978-3-8325-4456-0 42.50 EUR

221 Janne Krüger: Schülerperspektiven auf die zeitliche Entwicklung der Naturwissenschaften
ISBN 978-3-8325-4457-7 45.50 EUR

222 Stefan Mutke: Das Professionswissen von Chemiereferendarinnen und -referendaren in Nordrhein-Westfalen. *Eine Längsschnittstudie*
ISBN 978-3-8325-4458-4 37.50 EUR

223 Sebastian Habig: Systematisch variierte Kontextaufgaben und ihr Einfluss auf kognitive und affektive Schülerfaktoren
ISBN 978-3-8325-4467-6 40.50 EUR

224 Sven Liepertz: Zusammenhang zwischen dem Professionswissen von Physiklehrkräften, dem sachstrukturellen Angebot des Unterrichts und der Schülerleistung
ISBN 978-3-8325-4480-5 34.00 EUR

225 Elina Platova: Optimierung eines Laborpraktikums durch kognitive Aktivierung
ISBN 978-3-8325-4481-2 39.00 EUR

226 Tim Reschke: Lesegeschichten im Chemieunterricht der Sekundarstufe I zur Unterstützung von situationalem Interesse und Lernerfolg
ISBN 978-3-8325-4487-4 41.00 EUR

227 Lena Mareike Walper: Entwicklung der physikbezogenen Interessen und selbstbezogenen Kognitionen von Schülerinnen und Schülern in der Übergangsphase von der Primar- in die Sekundarstufe. *Eine Längsschnittanalyse vom vierten bis zum siebten Schuljahr*
ISBN 978-3-8325-4495-9 43.00 EUR

228 Stefan Anthofer: Förderung des fachspezifischen Professionswissens von Chemielehramtsstudierenden
ISBN 978-3-8325-4498-0 39.50 EUR

229 Marcel Bullinger: Handlungsorientiertes Physiklernen mit instruierten Selbsterklärungen in der Primarstufe. *Eine experimentelle Laborstudie*
ISBN 978-3-8325-4504-8 44.00 EUR

230 Thomas Amenda: Bedeutung fachlicher Elementarisierungen für das Verständnis der Kinematik
ISBN 978-3-8325-4531-4 43.50 EUR

231 Sabrina Milke: Beeinflusst *Priming* das Physiklernen?
Eine empirische Studie zum Dritten Newtonschen Axiom
ISBN 978-3-8325-4549-4 42.00 EUR

232 Corinna Erfmann: Ein anschaulicher Weg zum Verständnis der elektromagnetischen Induktion. *Evaluation eines Unterrichtsvorschlags und Validierung eines Leistungsdiagnoseinstruments*
ISBN 978-3-8325-4550-5 49.50 EUR

233 Hanne Rautenstrauch: Erhebung des (Fach-)Sprachstandes bei Lehramtsstudierenden im Kontext des Faches Chemie
ISBN 978-3-8325-4556-7 40.50 EUR

234 Tobias Klug: Wirkung kontextorientierter physikalischer Praktikumsversuche auf Lernprozesse von Studierenden der Medizin
ISBN 978-3-8325-4558-1 37.00 EUR

235 Mareike Bohrmann: Zur Förderung des Verständnisses der Variablenkontrolle im naturwissenschaftlichen Sachunterricht
ISBN 978-3-8325-4559-8 52.00 EUR

236 Anja Schödl: FALKO-Physik – Fachspezifische Lehrerkompetenzen im Fach Physik. *Entwicklung und Validierung eines Testinstruments zur Erfassung des fachspezifischen Professionswissens von Physiklehrkräften*
ISBN 978-3-8325-4553-6 40.50 EUR

237 Hilda Scheuermann: Entwicklung und Evaluation von Unterstützungsmaßnahmen zur Förderung der Variablenkontrollstrategie beim Planen von Experimenten
ISBN 978-3-8325-4568-0 39.00 EUR

238 Christian G. Strippel: Naturwissenschaftliche Erkenntnisgewinnung an chemischen Inhalten vermitteln. *Konzeption und empirische Untersuchung einer Ausstellung mit Experimentierstation*
ISBN 978-3-8325-4577-2 41.50 EUR

239 Sarah Rau: Durchführung von Sachunterricht im Vorbereitungsdienst. *Eine längsschnittliche, videobasierte Unterrichtsanalyse*
ISBN 978-3-8325-4579-6 46.00 EUR

240 Thomas Plotz: Lernprozesse zu nicht-sichtbarer Strahlung. *Empirische Untersuchungen in der Sekundarstufe 2*
ISBN 978-3-8325-4624-3 39.50 EUR

241 Wolfgang Aschauer: Elektrische und magnetische Felder. *Eine empirische Studie zu Lernprozessen in der Sekundarstufe II*
ISBN 978-3-8325-4625-0 50.00 EUR

242 Anna Donhauser: Didaktisch rekonstruierte Materialwissenschaft. *Aufbau und Konzeption eines Schülerlabors für den Exzellenzcluster Engineering of Advanced Materials*
ISBN 978-3-8325-4636-6 39.00 EUR

243 Katrin Schüßler: Lernen mit Lösungsbeispielen im Chemieunterricht. *Einflüsse auf Lernerfolg, kognitive Belastung und Motivation*
ISBN 978-3-8325-4640-3 42.50 EUR

244 Timo Fleischer: Untersuchung der chemischen Fachsprache unter besonderer Berücksichtigung chemischer Repräsentationen
ISBN 978-3-8325-4642-7 46.50 EUR

245 Rosina Steininger: Concept Cartoons als Stimuli für Kleingruppendiskussionen im Chemieunterricht. *Beschreibung und Analyse einer komplexen Lerngelegenheit*
ISBN 978-3-8325-4647-2 39.00 EUR

246 Daniel Rehfeldt: Erfassung der Lehrqualität naturwissenschaftlicher Experimentalpraktika
ISBN 978-3-8325-4590-1 40.00 EUR

247 Sandra Puddu: Implementing Inquiry-based Learning in a Diverse Classroom: Investigating Strategies of Scaffolding and Students' Views of Scientific Inquiry
ISBN 978-3-8325-4591-8 35.50 EUR

248 Markus Bliersbach: Kreativität in der Chemie. *Erhebung und Förderung der Vorstellungen von Chemielehramtsstudierenden*
ISBN 978-3-8325-4593-2 44.00 EUR

249 Lennart Kimpel: Aufgaben in der Allgemeinen Chemie. *Zum Zusammenspiel von chemischem Verständnis und Rechenfähigkeit*
ISBN 978-3-8325-4618-2 36.00 EUR

250 Louise Bindel: Effects of integrated learning: explicating a mathematical concept in inquiry-based science camps
ISBN 978-3-8325-4655-7 37.50 EUR

251 Michael Wenzel: Computereinsatz in Schule und Schülerlabor. *Einstellung von Physiklehrkräften zu Neuen Medien*
ISBN 978-3-8325-4659-5 38.50 EUR

252 Laura Muth: Einfluss der Auswertephase von Experimenten im Physikunterricht. *Ergebnisse einer Interventionsstudie zum Zuwachs von Fachwissen und experimenteller Kompetenz von Schülerinnen und Schülern*
ISBN 978-3-8325-4675-5 36.50 EUR

253 Annika Fricke: Interaktive Skripte im Physikalischen Praktikum. *Entwicklung und Evaluation von Hypermedien für die Nebenfachausbildung*
ISBN 978-3-8325-4676-2 41.00 EUR

254 Julia Haase: Selbstbestimmtes Lernen im naturwissenschaftlichen Sachunterricht. *Eine empirische Interventionsstudie mit Fokus auf Feedback und Kompetenzerleben*
ISBN 978-3-8325-4685-4 38.50 EUR

255 Antje J. Heine: Was ist Theoretische Physik? *Eine wissenschaftstheoretische Betrachtung und Rekonstruktion von Vorstellungen von Studierenden und Dozenten über das Wesen der Theoretischen Physik*
ISBN 978-3-8325-4691-5 46.50 EUR

256 Claudia Meinhardt: Entwicklung und Validierung eines Testinstruments zu Selbstwirksamkeitserwartungen von (angehenden) Physiklehrkräften in physikdidaktischen Handlungsfeldern
ISBN 978-3-8325-4712-7 47.00 EUR

257 Ann-Kathrin Schlüter: Professionalisierung angehender Chemielehrkräfte für einen Gemeinsamen Unterricht
ISBN 978-3-8325-4713-4 53.50 EUR

258 Stefan Richtberg: Elektronenbahnen in Feldern. Konzeption und Evaluation einer webbasierten Lernumgebung
ISBN 978-3-8325-4723-3 49.00 EUR

259 Jan-Philipp Burde: Konzeption und Evaluation eines Unterrichtskonzepts zu einfachen Stromkreisen auf Basis des Elektronengasmodells
ISBN 978-3-8325-4726-4 57.50 EUR

260 Frank Finkenberg: Flipped Classroom im Physikunterricht
ISBN 978-3-8325-4737-4 42.50 EUR

261 Florian Treisch: Die Entwicklung der Professionellen Unterrichtswahrnehmung im Lehr-Lern-Labor Seminar
ISBN 978-3-8325-4741-4 41.50 EUR

262 Desiree Mayr: Strukturiertheit des experimentellen naturwissenschaftlichen Problemlöseprozesses
ISBN 978-3-8325-4757-8 37.00 EUR

263 Katrin Weber: Entwicklung und Validierung einer Learning Progression für das Konzept der chemischen Reaktion in der Sekundarstufe I
ISBN 978-3-8325-4762-2 48.50 EUR

264 Hauke Bartels: Entwicklung und Bewertung eines performanznahen Videovignettentests zur Messung der Erklärfähigkeit von Physiklehrkräften
ISBN 978-3-8325-4804-9 37.00 EUR

265 Karl Marniok: Zum Wesen von Theorien und Gesetzen in der Chemie. *Begriffsanalyse und Förderung der Vorstellungen von Lehramtsstudierenden*
ISBN 978-3-8325-4805-6 42.00 EUR

266 Marisa Holzapfel: Fachspezifischer Humor als Methode in der Gesundheitsbildung im Übergang von der Primarstufe zur Sekundarstufe I
ISBN 978-3-8325-4808-7 50.00 EUR

267 Anna Stolz: Die Auswirkungen von Experimentiersituationen mit unterschiedlichem Öffnungsgrad auf Leistung und Motivation der Schülerinnen und Schüler
ISBN 978-3-8325-4781-3 38.00 EUR

268 Nina Ulrich: Interaktive Lernaufgaben in dem digitalen Schulbuch eChemBook. *Einfluss des Interaktivitätsgrads der Lernaufgaben und des Vorwissens der Lernenden auf den Lernerfolg*
ISBN 978-3-8325-4814-8 43.50 EUR

269 Kim-Alessandro Weber: Quantenoptik in der Lehrerfortbildung. *Ein bedarfsgeprägtes Fortbildungskonzept zum Quantenobjekt „Photon“ mit Realexperimenten*
ISBN 978-3-8325-4792-9 55.00 EUR

270 Nina Skorsetz: Empathisierer und Systematisierer im Vorschulalter. *Eine Fragebogen- und Videostudie zur Motivation, sich mit Naturphänomenen zu beschäftigen*
ISBN 978-3-8325-4825-4 43.50 EUR

271 Franziska Kehne: Analyse des Transfers von kontextualisiert erworbenem Wissen im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-4846-9 45.00 EUR

272 Markus Elsholz: Das akademische Selbstkonzept angehender Physiklehrkräfte als Teil ihrer professionellen Identität. *Dimensionalität und Veränderung während einer zentralen Praxisphase*
ISBN 978-3-8325-4857-5 37.50 EUR

273 Joachim Müller: Studienerfolg in der Physik. *Zusammenhang zwischen Modellierungskompetenz und Studienerfolg*
ISBN 978-3-8325-4859-9 35.00 EUR

274 Jennifer Dörschelln: Organische Leuchtdioden. *Implementation eines innovativen Themas in den Chemieunterricht*
ISBN 978-3-8325-4865-0 59.00 EUR

275 Stephanie Strelow: Beliefs von Studienanfängern des Kombi-Bachelors Physik über die Natur der Naturwissenschaften
ISBN 978-3-8325-4881-0 40.50 EUR

276 Dennis Jaeger: Kognitive Belastung und aufgabenspezifische sowie personenspezifische Einflussfaktoren beim Lösen von Physikaufgaben
ISBN 978-3-8325-4928-2 50.50 EUR

277 Vanessa Fischer: Der Einfluss von Interesse und Motivation auf die Messung von Fach- und Bewertungskompetenz im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-4933-6 39.00 EUR

278 René Dohrmann: Professionsbezogene Wirkungen einer Lehr-Lern-Labor-Veranstaltung. *Eine multimethodische Studie zu den professionsbezogenen Wirkungen einer Lehr-Lern-Labor-Blockveranstaltung auf Studierende der Bachelorstudiengänge Lehramt Physik und Grundschulpädagogik (Sachunterricht)*
ISBN 978-3-8325-4958-9 40.00 EUR

279 Meike Bergs: Can We Make Them Use These Strategies? *Fostering Inquiry-Based Science Learning Skills with Physical and Virtual Experimentation Environments*
ISBN 978-3-8325-4962-6 39.50 EUR

280 Marie-Therese Hauerstein: Untersuchung zur Effektivität von Strukturierung und Binnendifferenzierung im Chemieunterricht der Sekundarstufe I. *Evaluation der Strukturierungshilfe Lernleiter*
ISBN 978-3-8325-4982-4 42.50 EUR

281 Verena Zucker: Erkennen und Beschreiben von formativem Assessment im naturwissenschaftlichen Grundschulunterricht. *Entwicklung eines Instruments zur Erfassung von Teilfähigkeiten der professionellen Wahrnehmung von Lehramtsstudierenden*
ISBN 978-3-8325-4991-6 38.00 EUR

282 Victoria Telser: Erfassung und Förderung experimenteller Kompetenz von Lehrkräften im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-4996-1 50.50 EUR

283 Kristine Tschirschky: Entwicklung und Evaluation eines gedächtnisorientierten Aufgabendesigns für Physikaufgaben
ISBN 978-3-8325-5002-8 42.50 EUR

284 Thomas Elert: Course Success in the Undergraduate General Chemistry Lab
ISBN 978-3-8325-5004-2 41.50 EUR

285 Britta Kalthoff: Explizit oder implizit? *Untersuchung der Lernwirksamkeit verschiedener fachmethodischer Instruktionen im Hinblick auf fachmethodische und fachinhaltliche Fähigkeiten von Sachunterrichtsstudierenden*
ISBN 978-3-8325-5013-4 37.50 EUR

286 Thomas Dickmann: Visuelles Modellverständnis und Studienerfolg in der Chemie. *Zwei Seiten einer Medaille*
ISBN 978-3-8325-5016-5 44.00 EUR

287 Markus Sebastian Feser: Physiklehrkräfte korrigieren Schülertexte. *Eine Explorationsstudie zur fachlich-konzeptuellen und sprachlichen Leistungsfeststellung und -beurteilung im Physikunterricht*
ISBN 978-3-8325-5020-2 49.00 EUR

288 Matylda Dudzinska: Lernen mit Beispielaufgaben und Feedback im Physikunterricht der Sekundarstufe 1. *Energieerhaltung zur Lösung von Aufgaben nutzen*
ISBN 978-3-8325-5025-7 47.00 EUR

289 Ines Sonnenschein: Naturwissenschaftliche Denk- und Arbeitsprozesse Studierender im Labor
ISBN 978-3-8325-5033-2 52.00 EUR

290 Florian Simon: Der Einfluss von Betreuung und Betreuenden auf die Wirksamkeit von Schülerlaborbesuchen. *Eine Zusammenhangsanalyse von Betreuungsqualität, Betreuermerkmalen und Schülerlaborzielen sowie Replikationsstudie zur Wirksamkeit von Schülerlaborbesuchen*
ISBN 978-3-8325-5036-3 49.50 EUR

291 Marie-Annette Geyer: Physikalisch-mathematische Darstellungswechsel funktionaler Zusammenhänge. *Das Vorgehen von SchülerInnen der Sekundarstufe 1 und ihre Schwierigkeiten*
ISBN 978-3-8325-5047-9 46.50 EUR

292 Susanne Digel: Messung von Modellierungskompetenz in Physik. *Theoretische Herleitung und empirische Prüfung eines Kompetenzmodells physikspezifischer Modellierungskompetenz*
ISBN 978-3-8325-5055-4 41.00 EUR

293 Sönke Janssen: Angebots-Nutzungs-Prozesse eines Schülerlabors analysieren und gestalten. *Ein design-based research Projekt*
ISBN 978-3-8325-5065-3 57.50 EUR

294 Knut Wille: Der Productive Failure Ansatz als Beitrag zur Weiterentwicklung der Aufgabenkultur
ISBN 978-3-8325-5074-5 49.00 EUR

295 Lisanne Kraeva: Problemlösestrategien von Schülerinnen und Schülern diagnostizieren
ISBN 978-3-8325-5110-0 59.50 EUR

296 Jenny Lorentzen: Entwicklung und Evaluation eines Lernangebots im Lehramtsstudium Chemie zur Förderung von Vernetzungen innerhalb des fachbezogenen Professionswissens
ISBN 978-3-8325-5120-9 39.50 EUR

297 Micha Winkelmann: Lernprozesse in einem Schülerlabor unter Berücksichtigung individueller naturwissenschaftlicher Interessenstrukturen
ISBN 978-3-8325-5147-6 48.50 EUR

298 Carina Wöhlke: Entwicklung und Validierung eines Instruments zur Erfassung der professionellen Unterrichtswahrnehmung angehender Physiklehrkräfte
ISBN 978-3-8325-5149-0 43.00 EUR

299 Thomas Schubatzky: Das Amalgam Anfangs-Elektrizitätslehreunterricht. *Eine multiperspektivische Betrachtung in Deutschland und Österreich*
ISBN 978-3-8325-5159-9 50.50 EUR

300 Amany Annaggar: A Design Framework for Video Game-Based Gamification Elements to Assess Problem-solving Competence in Chemistry Education
ISBN 978-3-8325-5150-6 52.00 EUR

301 Alexander Engl: Chemie Pur – Unterrichten in der Natur: *Entwicklung und Evaluation eines kontextorientierten Unterrichtskonzepts im Bereich Outdoor Education zur Änderung der Einstellung zu „Chemie und Natur“*
ISBN 978-3-8325-5174-2 59.00 EUR

302 Christin Marie Sajons: Kognitive und motivationale Dynamik in Schülerlaboren. *Kontextualisierung, Problemorientierung und Autonomieunterstützung der didaktischen Struktur analysieren und weiterentwickeln*
ISBN 978-3-8325-5155-1 56.00 EUR

303 Philipp Bitzenbauer: Quantenoptik an Schulen. *Studie im Mixed-Methods Design zur Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik*
ISBN 978-3-8325-5123-0 59.00 EUR

304 Malte S. Ubben: Typisierung des Verständnisses mentaler Modelle mittels empirischer Datenerhebung am Beispiel der Quantenphysik
ISBN 978-3-8325-5181-0 43.50 EUR

305 Wiebke Kuske-Janßen: Sprachlicher Umgang mit Formeln von LehrerInnen im Physikunterricht am Beispiel des elektrischen Widerstandes in Klassenstufe 8
ISBN 978-3-8325-5183-4 47.50 EUR

306 Kai Bliesmer: Physik der Küste für außerschulische Lernorte. *Eine Didaktische Rekonstruktion*
ISBN 978-3-8325-5190-2 58.00 EUR

307 Nikola Schild: Eignung von domänenspezifischen Studieneingangsvariablen als Prädiktoren für Studienerfolg im Fach und Lehramt Physik
ISBN 978-3-8325-5226-8 42.00 EUR

308 Daniel Averbeck: Zum Studienerfolg in der Studieneingangsphase des Chemiestudiums. *Der Einfluss kognitiver und affektiv-motivationaler Variablen*
ISBN 978-3-8325-5227-5 51.00 EUR

309 Martina Strübe: Modelle und Experimente im Chemieunterricht. *Eine Videostudie zum fachspezifischen Lehrerwissen und -handeln*
ISBN 978-3-8325-5245-9 45.50 EUR

310 Wolfgang Becker: Auswirkungen unterschiedlicher experimenteller Repräsentationen auf den Kenntnisstand bei Grundschulkindern
ISBN 978-3-8325-5255-8 50.00 EUR

311 Marvin Rost: Modelle als Mittel der Erkenntnisgewinnung im Chemieunterricht der Sekundarstufe I. *Entwicklung und quantitative Dimensionalitätsanalyse eines Testinstruments aus epistemologischer Perspektive*
ISBN 978-3-8325-5256-5 44.00 EUR

312 Christina Kobl: Förderung und Erfassung der Reflexionskompetenz im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-5259-6 41.00 EUR

313 Ann-Kathrin Beretz: Diagnostische Prozesse von Studierenden des Lehramts – *eine Videostudie in den Fächern Physik und Mathematik*
ISBN 978-3-8325-5288-6 45.00 EUR

314 Judith Breuer: Implementierung fachdidaktischer Innovationen durch das Angebot materialgestützter Unterrichtskonzeptionen. *Fallanalysen zum Nutzungsverhalten von Lehrkräften am Beispiel des Münchener Lehrgangs zur Quantenmechanik*
ISBN 978-3-8325-5293-0 50.50 EUR

315 Michaela Oettle: Modellierung des Fachwissens von Lehrkräften in der Teilchenphysik. *Eine Delphi-Studie*
ISBN 978-3-8325-5305-0 57.50 EUR

316 Volker Brüggemann: Entwicklung und Pilotierung eines adaptiven Multistage-Tests zur Kompetenzerfassung im Bereich naturwissenschaftlichen Denkens
ISBN 978-3-8325-5331-9 40.00 EUR

317 Stefan Müller: Die Vorläufigkeit und soziokulturelle Eingebundenheit naturwissenschaftlicher Erkenntnisse. *Kritische Reflexion, empirische Befunde und fachdidaktische Konsequenzen für die Chemielehrer*innenbildung*
ISBN 978-3-8325-5343-2 63.00 EUR

318 Laurence Müller: Alltagsentscheidungen für den Chemieunterricht erkennen und Entscheidungsprozesse explorativ begleiten
ISBN 978-3-8325-5379-1 59.00 EUR

319 Lars Ehlert: Entwicklung und Evaluation einer Lehrkräftefortbildung zur Planung von selbstgesteuerten Experimenten
ISBN 978-3-8325-5393-71 41.50 EUR

320 Florian Seiler: Entwicklung und Evaluation eines Seminarkonzepts zur Förderung der experimentellen Planungskompetenz von Lehramtsstudierenden im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-5397-5 47.50 EUR

321 Nadine Boele: Entwicklung eines Messinstruments zur Erfassung der professionellen Unterrichtswahrnehmung von (angehenden) Chemielehrkräften hinsichtlich der Lernunterstützung
ISBN 978-3-8325-5402-6 46.50 EUR

322 Franziska Zimmermann: Entwicklung und Evaluation digitalisierungsbezogener Kompetenzen von angehenden Chemielehrkräften
ISBN 978-3-8325-5410-1 49.50 EUR

323 Lars-Frederik Weiß: Der Flipped Classroom in der Physik-Lehre. *Empirische Untersuchungen in Schule und Hochschule*
ISBN 978-3-8325-5418-7 51.00 EUR

324 Tilmann Steinmetz: Kumulatives Lehren und Lernen im Lehramtsstudium Physik. *Theorie und Evaluation eines Lehrkonzepts*
ISBN 978-3-8325-5421-7 51.00 EUR

325 Kübra Nur Celik: Entwicklung von chemischem Fachwissen in der Sekundarstufe I. *Validierung einer Learning Progression für die Basiskonzepte „Struktur der Materie“, „Chemische Reaktion“ und „Energie“ im Kompetenzbereich „Umgang mit Fachwissen“*
ISBN 978-3-8325-5431-6 55.00 EUR

326 Matthias Ungermann: Förderung des Verständnisses von Nature of Science und der experimentellen Kompetenz im Schüler*innen-Labor Physik in Abgrenzung zum Regelunterricht
ISBN 978-3-8325-5442-2 55.50 EUR

327 Christoph Hoyer: Multimedial unterstütztes Experimentieren im webbasierten Labor zur Messung, Visualisierung und Analyse des Feldes eines Permanentmagneten
ISBN 978-3-8325-5453-8 45.00 EUR

328 Tobias Schüttler: Schülerlabore als interessefördernde authentische Lernorte für den naturwissenschaftlichen Unterricht nutzen
ISBN 978-3-8325-5454-5 50.50 EUR

329 Christopher Kurth: Die Kompetenz von Studierenden, Schülerschwierigkeiten beim eigenständigen Experimentieren zu diagnostizieren
ISBN 978-3-8325-5457-6 58.50 EUR

330 Dagmar Michna: Inklusiver Anfangsunterricht Chemie *Entwicklung und Evaluation einer Unterrichtseinheit zur Einführung der chemischen Reaktion*
ISBN 978-3-8325-5463-7 49.50 EUR

331 Marco Seiter: Die Bedeutung der Elementarisierung für den Erfolg von Mechanikunterricht in der Sekundarstufe I
ISBN 978-3-8325-5471-2 66.00 EUR

332 Jörn Hägele: Kompetenzaufbau zum experimentbezogenen Denken und Arbeiten. *Videobasierte Analysen zu Aktivitäten und Vorstellungen von Schülerinnen und Schülern der gymnasialen Oberstufe bei der Bearbeitung von fachmethodischer Instruktion*
ISBN 978-3-8325-5476-7 56.50 EUR

333 Erik Heine: Wissenschaftliche Kontroversen im Physikunterricht. *Explorationsstudie zum Umgang von Physiklehrkräften und Physiklehramtsstudierenden mit einer wissenschaftlichen Kontroverse am Beispiel der Masse in der Speziellen Relativitätstheorie*
ISBN 978-3-8325-5478-1 48.50 EUR

334 Simon Goertz: Module und Lernzirkel der Plattform FLexKom zur Förderung experimenteller Kompetenzen in der Schulpraxis *Verlauf und Ergebnisse einer Design-Based Research Studie*
ISBN 978-3-8325-5494-1 66.50 EUR

335 Christina Toschka: Lernen mit Modellexperimenten *Empirische Untersuchung der Wahrnehmung und des Denkens in Analogien beim Umgang mit Modellexperimenten*
ISBN 978-3-8325-5495-8 50.00 EUR

336 Alina Behrendt: Chemiebezogene Kompetenzen in der Übergangsphase zwischen dem Sachunterricht der Primarstufe und dem Chemieunterricht der Sekundarstufe I
ISBN 978-3-8325-5498-9 40.50 EUR

337 Manuel Daiber: Entwicklung eines Lehrkonzepts für eine elementare Quantenmechanik *Formuliert mit In-Out Symbolen*
ISBN 978-3-8325-5507-8 48.50 EUR

338 Felix Pawlak: Das Gemeinsame Experimentieren (an-)leiten *Eine qualitative Studie zum chemiespezifischen Classroom-Management*
ISBN 978-3-8325-5508-5 46.50 EUR

339 Liza Dopatka: Konzeption und Evaluation eines kontextstrukturierten Unterrichtskonzeptes für den Anfangs-Elektrizitätslehreunterricht
ISBN 978-3-8325-5514-6 69.50 EUR

340 Arne Bewersdorff: Untersuchung der Effektivität zweier Fortbildungsformate zum Experimentieren mit dem Fokus auf das Unterrichtshandeln
ISBN 978-3-8325-5522-1 39.00 EUR

341 Thomas Christoph Münster: Wie diagnostizieren Studierende des Lehramtes physikbezogene Lernprozesse von Schüler*innen? Eine Videostudie zur Mechanik
ISBN 978-3-8325-5534-4 44.50 EUR

342 Ines Komor: Förderung des symbolisch-mathematischen Modellverständnisses in der Physikalischen Chemie
ISBN 978-3-8325-5546-7 46.50 EUR

343 Verena Petermann: Überzeugungen von Lehrkräften zum Lehren und Lernen von Fachinhalten und Fachmethoden und deren Beziehung zu unterrichtsnahem Handeln
ISBN 978-3-8325-5545-0 47.00 EUR

344 Jana Heinze: Einfluss der sprachlichen Konzeption auf die Einschätzung der Qualität instruktionaler Unterrichtserklärungen im Fach Physik
ISBN 978-3-8325-5545-0 47.00 EUR

345 Jannis Weber: Mathematische Modellbildung und Videoanalyse zum Lernen der Newtonschen Dynamik im Vergleich
ISBN 978-3-8325-5566-5 68.00 EUR

346 Fabian Sterzing: Zur Lernwirksamkeit von Erklärvideos in der Physik *Eine Untersuchung in Abhängigkeit von ihrer fachdidaktischen Qualität und ihrem Einbettungsformat*
ISBN 978-3-8325-5576-4 52.00 EUR

347 Lars Greitemann: Wirkung des Tablet-Einsatzes im Chemieunterricht der Sekundarstufe I unter besonderer Berücksichtigung von Wissensvermittlung und Wissenssicherung
ISBN 978-3-8325-5580-1 50.00 EUR

348 Fabian Poensgen: Diagnose experimenteller Kompetenzen in der laborpraktischen Chemielehrer*innenbildung
ISBN 978-3-8325-5587-0 48.00 EUR

349 William Lindlahr: Virtual-Reality-Experimente *Entwicklung und Evaluation eines Konzepts für den forschend-entwickelnden Physikunterricht mit digitalen Medien*
ISBN 978-3-8325-5595-5 49.00 EUR

350 Bert Schlüter: Teilnahmemotivation und situationales Interesse von Kindern und Eltern im experimentellen Lernsetting KEMIE
ISBN 978-3-8325-5598-6 43.00 EUR

351 Katharina Nave: Charakterisierung situativer mentaler Modellkomponenten in der Chemie und die Bildung von Hypothesen *Eine qualitative Studie zur Operationalisierung mentaler Modell-komponenten für den Fachbereich Chemie*
ISBN 978-3-8325-5599-3 43.00 EUR

352 Anna B. Bauer: Experimentelle Kompetenz Physikstudierender *Entwicklung und erste Erprobung eines performanzorientierten Kompetenzstrukturmodells unter Nutzung qualitativer Methoden*
ISBN 978-3-8325-5625-9 47.00 EUR

353 Jan Schröder: Entwicklung eines Performanztests zur Messung der Fähigkeit zur Unterrichtsplanung bei Lehramtsstudierenden im Fach Physik
ISBN 978-3-8325-5655-9 46.50 EUR

354 Susanne Gerlach: Aspekte einer Fachdidaktik Körperpflege *Ein Beitrag zur Standardentwicklung*
ISBN 978-3-8325-5659-4 45.00 EUR

355 Livia Murer: Diagnose experimenteller Kompetenzen beim praktisch-naturwissenschaftlichen Arbeiten *Vergleich verschiedener Methoden und kognitive Validierung eines Testverfahrens*
ISBN 978-3-8325-5657-0 41.50 EUR

Studien zum Physik- und Chemielernen

Herausgegeben von Martin Hopf, Hans Niedderer, Mathias Ropohl und Elke Sumfleth

Die Reihe umfasst inzwischen eine große Zahl von wissenschaftlichen Arbeiten aus vielen Arbeitsgruppen der Physik- und Chemiedidaktik und zeichnet damit ein gültiges Bild der empirischen physik- und chemiedidaktischen Forschung im deutschsprachigen Raum.
Die Herausgeber laden daher Interessenten zu neuen Beiträgen ein und bitten sie, sich im Bedarfsfall an den Logos-Verlag oder an ein Mitglied des Herausgeberteams zu wenden.

Kontaktadressen:

Univ.-Prof. Dr. Martin Hopf
Universität Wien,
Österreichisches Kompetenzzentrum
für Didaktik der Physik,
Porzellangasse 4, Stiege 2,
1090 Wien, Österreich,
Tel. +43-1-4277-60330,
e-mail: martin.hopf@univie.ac.at

Prof. Dr. Hans Niedderer
Inst. f. Didaktik der Naturwissenschaften,
Abt. Physikdidaktik,
FB Physik/ Elektrotechnik,
Universität Bremen,
Postfach 33 04 40, 28334 Bremen
Tel. 0421-218 4695 (Sekretariat),
e-mail: niedderer@physik.uni-bremen.de

Prof. Dr. Mathias Ropohl
Didaktik der Chemie,
Fakultät für Chemie,
Universität Duisburg-Essen,
Schützenbahn 70, 45127 Essen,
Tel. 0201-183 2704,
e-mail: mathias.ropohl@uni-due.de

Prof. Dr. Elke Sumfleth
Didaktik der Chemie,
Fakultät für Chemie,
Universität Duisburg-Essen,
Schützenbahn 70, 45127 Essen
Tel. 0201-183 3757/3761,
e-mail: elke.sumfleth@uni-due.de

Laborpraktika stellen im Rahmen des Studiums eine zentrale Lerngelegenheit für den Erwerb experimenteller Fähigkeiten dar. Die Lernwirksamkeit des Formates wird jedoch stark kritisiert. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass solche Lernumgebungen bisher oft nicht didaktisch fundiert, sondern über Jahrzehnte hinweg intuitiv (weiter-)entwickelt wurden.

Im aktuellen Diskurs ist unklar, welche experimentellen Fähigkeiten in welcher Ausprägung von den Studierenden erworben werden müssen, um die Forschungsmethodik des Experimentierens zu erwerben.

Um dem Fehlen einer didaktisch begründeten Modellierung experimenteller Fähigkeiten auf Hochschulniveau zu begegnen, wurde im Rahmen der Arbeit ein performanzorientiertes Kompetenzstrukturmodell entwickelt. Die Modellierung erfolgte auf Basis der Analyse videografierter experimenteller Performanz $N = 16$). Die Entwicklung der Dimensionen Fachmethodik und Qualitätsausprägung wurde unter Nutzung der qualitativen Forschungsansätze Dokumentarische Methode und Typenbildung realisiert. Das Modell wurde anschließend multiperspektivisch geprüft.

Die vorgelegte Modellierung der experimentellen Fähigkeiten präzisiert die Lernziele des Formates Laborpraktika. Sie liefert damit eine Orientierung für ihre didaktisch begründete Weiterentwicklung. Weiter können aus ihr Messinstrumente abgeleitet werden, die eine individuelle Diagnose von Fähigkeiten, aber auch eine Prüfung der Lernwirksamkeit verschiedener Praktikumskonzepte ermöglichen.

Logos Verlag Berlin

ISBN 978-3-8325-5625-9