

Studien zum Physik- und Chemielernen

H. Niedderer, H. Fischler, E. Sumfleth [Hrsg.]

303

Philipp Bitzenbauer

Quantenoptik an Schulen

Studie im Mixed-Methods Design zur Evaluation
des Erlanger Unterrichtskonzepts zur
Quantenoptik



λογος

Studien zum Physik- und Chemielernen

Herausgegeben von Hans Niedderer, Helmut Fischler und Elke Sumfleth

Diese Reihe im Logos-Verlag bietet ein Forum zur Veröffentlichung von wissenschaftlichen Studien zum Physik- und Chemielernen. In ihr werden Ergebnisse empirischer Untersuchungen zum Physik- und Chemielernen dargestellt, z. B. über Schülervorstellungen, Lehr-/Lernprozesse in Schule und Hochschule oder Evaluationsstudien. Von Bedeutung sind auch Arbeiten über Motivation und Einstellungen sowie Interessensgebiete im Physik- und Chemieunterricht. Die Reihe fühlt sich damit der Tradition der empirisch orientierten Forschung in den Fachdidaktiken verpflichtet. Die Herausgeber hoffen, durch die Herausgabe von Studien hoher Qualität einen Beitrag zur weiteren Stabilisierung der physik- und chemiedidaktischen Forschung und zur Förderung eines an den Ergebnissen fachdidaktischer Forschung orientierten Unterrichts in den beiden Fächern zu leisten.

Hans Niedderer

Helmut Fischler

Elke Sumfleth

Studien zum Physik- und Chemielernen

Band 303

Philipp Bitzenbauer

Quantenoptik an Schulen

Studie im Mixed-Methods Design zur Evaluation
des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik

Logos Verlag Berlin



Studien zum Physik- und Chemielernen

Hans Niederer, Helmut Fischler, Elke Sumfleth [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.



Das Werk steht unter der Creative-Commons-Lizenz Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode>).

Der Anhang ist in der Open Access-Version zu finden.

© Copyright Logos Verlag Berlin GmbH 2020

Alle Rechte vorbehalten.

ISBN 978-3-8325-5123-0

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>

Quantenoptik an Schulen

*Studie im Mixed-Methods-Design zur Evaluation des Erlanger
Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik*

Dissertation

Der Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg
zur Erlangung des Doktorgrades Dr. rer. nat.

vorgelegt von
Philipp Bitzenbauer
aus Altdorf

Als Dissertation genehmigt
von der Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

1. Gutachter: Prof. Dr. Jan-Peter Meyn
2. Gutachter: Prof. Dr. Rainer Müller
Vorsitzender des Promotionsorgans: Prof. Dr. Georg Kreimer

Für Alena in Liebe,
meinen Eltern zum Dank
und der Quantenphysik als Verneigung.

Teile dieser Arbeit sind bereits veröffentlicht in:

- Bitzenbauer, P. ; Meyn, J.-P. (2019). Quantenphysik g^2 reifbar unterrichten. In: Plus Lucis 3/2019, S. 17-21.
- Bitzenbauer, P. ; Meyn, J.-P. (2020). Evaluation eines Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik mit Einzelphotonenexperimenten – Ergebnisse einer Pilotstudie. In: Habig, S. (Hrsg.): Naturwissenschaftliche Kompetenzen in der Gesellschaft von morgen, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Wien 2019, Band 40, S. 487-490.
- Bitzenbauer, P. ; Meyn, J.-P. (2020). A new teaching concept on quantum physics in secondary schools. In: Physics Education **55** 055031.
<https://doi.org/10.1088/1361-6552/aba208>
- Bitzenbauer, P. ; Meyn, J.-P. (2020). Von Koinzidenzen zu Wesenszügen der Quantenphysik: Erste Ergebnisse einer summativen Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik. In: PhyDid-B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, 2020.
- Donhauser, A. ; Bitzenbauer, P. ; Meyn, J.-P. (2020). Von Schnee- und Elektronenlawinen: Entwicklung eines Erklärvideos zu Einzelphotonendetektoren. In: PhyDid-B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, 2020.
- Bitzenbauer, P. ; Meyn, J.-P. (2020). Inhaltsvalidität eines Testinstruments zur Erfassung deklarativen Wissens zur Quantenoptik. In: PhyDid-B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, 2020.
- Bitzenbauer, P. ; Meyn, J.-P. (2020). Fostering students' conceptions about the quantum world - results of an interview study. In: Progress in Science Education (eingereicht)

Kurzfassung

In dieser Arbeit werden die Ergebnisse einer Studie zum Unterricht moderner Quantenphysik in der Oberstufe an Gymnasien berichtet. Dazu wird mit dem Erlanger Unterrichtskonzept zur Quantenoptik ein Lehrkonzept vorgestellt, mit dem die Anforderungen, die aus Fachwissenschaft, Fachdidaktik und Unterrichtspraxis an den Quantenphysikunterricht gestellt werden, erfüllt werden sollen. So soll den Lernenden zu anschlussfähigem Wissen bis hin zu Quantentechnologien verholfen werden.

Das Erlanger Unterrichtskonzept wurde umfassend an Schulen erprobt und die Ergebnisse dieser Evaluation sind das Herzstück dieser Arbeit: zunächst diente eine formative Evaluation mittels Akzeptanzbefragung der Überarbeitung des Konzepts auf Grundlage der Rückmeldungen einzelner Lernender, anschließend folgte eine summative Evaluation im Mixed-Methods-Design. Dazu wurden ein neu entwickeltes Testinstrument zur Quantenoptik im Prä-Post-Follow-Up-Testdesign eingesetzt, sowie ein aus der Literatur adaptierter Vorstellungsfragebogen. Außerdem wurden leitfadengestützte Interviews mit Studienteilnehmerinnen und -teilnehmern durchgeführt. An der Hauptstudie waren $N = 171$ Schülerinnen und Schüler aus zwölf Kursen der gymnasialen Oberstufe beteiligt, die vor der Intervention keinerlei unterrichtlicher Kontakte zur Quantenphysik hatten, wobei $N = 118$ den Vorstellungsfragebogen im Anschluss an die Intervention bearbeiteten. Eine Zufallsstichprobe von $N = 25$ Schülerinnen und Schüler nahm außerdem an der Interviewstudie teil.

Die Ergebnisse zeichnen folgendes Bild: Schülerinnen und Schüler der gymnasialen Oberstufe haben durchaus ein Interesse an moderner Quantenphysik, so wie sie im Erlanger Konzept vermittelt wird. Es können nicht nur deutliche Zuwächse im deklarativen Wissen festgestellt werden, auch die Untersuchung der Vorstellungen der Lernenden bestätigt: Verbreitete Schülervorstellungen zur Quantenphysik, etwa solche, die durch mechanistische Denkweisen geprägt sind, sind zwar bei einigen Lernenden feststellbar, allerdings zeigte auch eine große Teilmenge der beforschten Schülerinnen und Schüler keinerlei Einflüsse mechanistisch geprägter Vorstellungen.

Die konsequente Vermeidung mechanistischer Sprechweisen und der Ausschluss eines Welle-Teilchen-Dualismus aus dem Quantenphysikunterricht, wie im Erlanger Unterrichtskonzept vorgeschlagen, besitzen das Potential, dass Lernende schon sehr früh weitgehend quantenphysikalisch geprägte Vorstellungen entwickeln und damit in der Lage sind, die markanten Unterschiede zwischen klassischer Physik und Quantenphysik zu benennen. Quantenphysikunterricht, der Schülerinnen und Schüler bis hin zu den

Quantentechnologien führt oder zumindest uneingeschränkt anschlussfähig ist, ist in der gymnasialen Oberstufe also grundsätzlich möglich.

Abstract

With this thesis we report on a new teaching concept on modern quantum physics in secondary schools. The Erlanger teaching concept on quantum optics is presented as a teaching proposal, which tries to meet the requirements of science, didactics and teaching practice in equal measure in order to help students to acquire adequate knowledge about modern quantum physics up to quantum technologies.

The Erlanger teaching concept was tested in secondary schools and the results of this evaluation are the core of this thesis: first, a formative evaluation by means of an acceptance survey served to revise the concept based on feedback from individual learners. Then a summative evaluation in a mixed-method design was conducted. For this purpose, a newly developed test instrument for quantum optics was used in a pre-post-follow-up test design, as well as an imagination questionnaire which was adapted from literature. In addition, interviews were conducted with study participants. The main study involved $N = 171$ students from twelve high school courses. None of the students had any prior knowledge in quantum physics before the intervention of this study. $N = 118$ of the students completed the imagination questionnaire after the intervention. A random sample of $N = 25$ students also participated in the interview study.

The results draw the following picture: Students seem to have an interest in modern quantum physics as it is taught in the Erlanger concept. Not only significant increases in declarative knowledge can be observed, also the investigations of the students' conceptions show: Although widespread student conceptions on quantum physics, such as those influenced by mechanistic ways of thinking, can also be observed here, a large subset of the students showed no mechanistically influenced ideas.

The consistent avoidance of mechanistic ways of speaking and the exclusion of wave-particle dualism from quantum physics lessons, as proposed in the Erlanger teaching concept, thus have the potential that learners develop largely quantum physics-based conceptions at a very early age and are thus able to name the striking differences between classical physics and quantum physics. Quantum physics lessons that take students all the way to quantum technologies are thus basically possible in secondary schools.

Hinweise zum Lesen dieser Arbeit

Zur Strukturierung dieser Arbeit wurde von einigen didaktischen Elementen Gebrauch gemacht. Am Anfang von jedem Kapitel findet sich ein roter Kasten. In diesem wird erklärt, wie das jeweilige Kapitel an das vorherige anschließt und inwiefern es Inhalte bereitstellt, die für nachfolgende Kapitel von Bedeutung sind. Passend zur Farbe der Kästen verdeutlichen diese also den roten Faden der Arbeit.

Einordnung in den Kontext der Arbeit

Solche farbigen Kästen sind zu Beginn jedes Kapitels zu finden.

Es wird der Versuch unternommen, mit dieser Arbeit eine größtmögliche Zielgruppe anzusprechen - ob Lehrkräfte aus der Praxis, Kolleginnen und Kollegen aus der Fachdidaktik oder Fachwissenschaftlerinnen und -wissenschaftler. Deswegen werden an mancher Stelle gewisse Begriffe genauer erläutert oder der Einsatz einer Methode kommentiert. Solche Einschübe sind mit Hilfe der Glühbirne hervorgehoben:



In solchen Einschüben werden Begriffe erläutert oder Methoden kommentiert.

Insbesondere in den Abschnitten der Arbeit, die dem Design der Studie oder der Auswertemethodik gewidmet sind, finden sich immer wieder Beispiele, die eine Situation verdeutlichen sollen. Diese Beispiele erkennt man an der Klammer:



Beispiel: Auf diese Art und Weise werden in dieser Arbeit Beispiele aus dem Fließtext abgehoben.

Außerdem ist es mitunter notwendig, wichtige Zwischenergebnisse oder bemerkenswerte Informationen bereitzustellen, die im weiteren Verlauf der Arbeit wieder verwendet werden. Solche Informationen werden mit Hilfe der folgenden Informationsboxen besonders hervorgehoben:



Wichtige Informationen, Fakten oder Ideen, die im späteren Verlauf der Arbeit wieder benötigt werden, sind auf diese Art hervorgehoben. Auch Einschübe für Verweise an bereits vorgetragene Argumente, kritische Bemerkungen oder Kommentare werden so gekennzeichnet.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Kurzfassung | 5 |
| Abstract | 7 |
| Hinweise zum Lesen dieser Arbeit | 9 |
| Ziele und Aufbau der Arbeit | 15 |
| I Quantenphysik lehren | 19 |
| 1 Didaktik der Quantenphysik: Ausgewählte Forschungsergebnisse und Anforderungen an ein neues Curriculum | 21 |
| 1.1 Quantenphysikunterricht heute: inhaltliche Perspektive | 22 |
| 1.2 Fachdidaktische Perspektive: Unterrichtskonzepte und Lernendenvorstellungen zur Quantenphysik | 27 |
| 1.3 Perspektive der Lehrenden | 33 |
| 1.4 Perspektive der Lernenden | 35 |
| 1.5 Zusammenfassung: Anforderungen an ein neues Unterrichtskonzept zur Quantenphysik | 35 |
| 2 Erlanger Unterrichtskonzept zur Quantenoptik | 37 |
| 2.1 Bezug zu den Anforderungen an ein neues Unterrichtskonzept | 38 |
| 2.2 Zielgruppe, Inhalte, curriculare Passung und Lernvoraussetzungen | 40 |
| 2.3 Das IBE als Repräsentationsform | 44 |
| 2.4 Begriffe und Konzepte | 46 |
| 2.5 Fachliche Grenzen und Anschlussfähigkeit des Konzepts | 55 |
| 2.6 Sachstruktur des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik | 58 |
| 2.7 Zusammenfassung und Standortsbestimmung | 65 |
| 3 Formative Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik | 67 |
| 3.1 Die Methode der Akzeptanzbefragung | 68 |
| 3.2 Stichprobe, Forschungsfragen und Ablauf der Erhebung | 70 |
| 3.3 Kodierleitfäden | 72 |
| 3.4 Ergebnisse | 77 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 3.5 | Diskussion der Ergebnisse und Implikationen | 84 |
| 3.6 | Zusammenfassung der formativen Evaluation und Ausblick | 86 |
| II | Vorbereitungen einer summativen Evaluation | 87 |
| 4 | Anlage und Vorbereitungen einer Studie zur summativen Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik | 89 |
| 4.1 | Forschungsfragen und Studiendesign | 89 |
| 4.2 | Erhebungsinstrumente zu affektiven und kognitiven Lernermerkmalen | 96 |
| 4.3 | Erhebungsinstrument zum Begriffswissen Quantenoptik | 98 |
| 4.4 | Erhebung von Vorstellungen und konzeptuellem Wissen zu den Wesenszügen der Quantenphysik | 104 |
| 5 | Pilotstudie I: Lautes Denken | 111 |
| 5.1 | Das Laute Denken als Forschungsmethode | 111 |
| 5.2 | Stichprobe und methodisches Vorgehen | 113 |
| 5.3 | Kategoriensystem und Auswerteverfahren | 114 |
| 5.4 | Ergebnisse der „Laute Denken“-Erhebung | 116 |
| 5.5 | Diskussion der Ergebnisse und Einblicke in die Itemrevision | 117 |
| 5.6 | Zusammenfassung der Ergebnisse aus Pilotstudie I | 122 |
| 6 | Pilotstudie II | 123 |
| 6.1 | Ziele, Durchführung und Stichprobe | 123 |
| 6.2 | Ergebnisse der Itemanalyse | 125 |
| 6.3 | Ergebnisse der Reliabilitätsanalyse | 128 |
| 6.4 | Validität | 131 |
| 6.5 | Zusammenfassung zu Objektivität, Reliabilität und Validität | 144 |
| 6.6 | Diskussion weiterer Ergebnisse | 145 |
| III | Summative Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik | 149 |
| 7 | Stichprobe und Methodik der Auswertung | 151 |
| 7.1 | Stichprobe | 152 |
| 7.2 | Statistische Methoden | 154 |
| 8 | Affektive und kognitive Lernermerkmale | 169 |
| 8.1 | Affektive Lernermerkmale | 170 |
| 8.2 | Kognitive Lernermerkmale | 174 |
| 8.3 | Zusammenfassung | 175 |
| 9 | Entwicklung des deklarativen Wissens zur Quantenoptik | 177 |
| 9.1 | Itemschwierigkeiten, Trennschärfe und interne Konsistenz | 178 |
| 9.2 | Prä-, Post- und Follow-Up-Testergebnisse: Lernzuwachs | 179 |
| 9.3 | Geschlechterspezifische Analyse des Lernzuwachses | 181 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 9.4 | Analyse nach Leistungsterzilen | 183 |
| 9.5 | Prädiktoren für das Posttestergebnis | 184 |
| 9.6 | Analyse der Antwortsicherheit | 188 |
| 9.7 | Inhaltsspezifische Analyse des Lernzuwachses | 189 |
| 9.8 | Zusammenfassung | 192 |
| 10 | Ergebnisse zur Förderung quantenphysikalischer Vorstellungen | 193 |
| 10.1 | Vorstellungen zur Wahrscheinlichkeitsdeutung | 194 |
| 10.2 | Vorstellungen zum Eigenschaftsbegriff | 196 |
| 10.3 | Gesamtindex in der Übersicht | 199 |
| 10.4 | Zusammenfassung | 201 |
| 11 | Konzeptverständnis und Vorstellungen Lernender zur Quantenphysik – Auswertung der leitfadengestützten Interviews | 203 |
| 11.1 | Vorstellungen zur Quantenwelt | 204 |
| 11.2 | Vorstellungen zum statistischen Verhalten | 209 |
| 11.3 | Vorstellungen zur Interferenzfähigkeit einzelner Quantenobjekte | 214 |
| 11.4 | Vorstellungen zu Photonen | 217 |
| 11.5 | Vorstellungen zur Eigenschaft Ort in der Quantenphysik | 222 |
| 11.6 | Verständnis zur Präparation von Quantenzuständen | 228 |
| 11.7 | Verständnis zur Antikorrelation am halbdurchlässigen Spiegel | 230 |
| 11.8 | Zusammenfassung | 234 |
| 11.9 | Vergleich der Ergebnisse mit Literatur zu Schülervorstellungen in der Quantenphysik | 239 |
| 12 | Triangulation zwischen den Erhebungsmethoden | 245 |
| 12.1 | Wissen, Verständnis und Vorstellungen zur Quantenphysik | 246 |
| 12.2 | Vorstellungen zur Eigenschaft Ort und zur Wahrscheinlichkeitsdeutung | 248 |
| 12.3 | Photonen | 251 |
| 13 | Ergebnisse der Befragung von Lehrkräften | 253 |
| 13.1 | Datenerhebung und Stichprobe | 253 |
| 13.2 | Didaktische Einschätzung des Unterrichtskonzepts | 254 |
| 13.3 | Unterrichtspraktische Beurteilung der bereitgestellten Lernhefte | 256 |
| 13.4 | Einsatz des Konzepts im zukünftigen Unterricht | 256 |
| IV | Reflexion, Diskussion & Ausblick | 259 |
| 14 | Reflexion und Diskussion | 261 |
| 14.1 | Limitationen der Studie: Kritische Betrachtungen und Anmerkungen | 261 |
| 14.2 | Diskussion | 264 |
| 15 | Ausblick | 275 |
| | Danksagung | 279 |

| | | |
|----------|-----------------------------|------------|
| V | Anhang | 281 |
| A | Zu Kapitel 2 | 283 |
| B | Zu Kapitel 3 | 293 |
| C | Zu Kapitel 4 | 301 |
| D | Zu Kapitel 5 | 335 |
| E | Zu Kapitel 6 | 339 |
| F | Zu Kapitel 7 | 355 |
| G | Zu Kapitel 11 | 359 |
| | Literaturverzeichnis | 395 |

Ziele und Aufbau der Arbeit

„The Second Quantum Revolution is unfolding now, exploiting the enormous advancements in our ability to detect and manipulate single quantum objects.“

- Quantum Flagship

„The future is quantum“ [56] - dieser Satz darf wohl als das Motto des Quantum Flagships der Europäischen Union verstanden werden. Mit einer über 10 Jahre angelegten Initiative und einer Gesamtfördersumme von einer Milliarde Euro soll Europa „zu einer dynamischen und attraktiven Region für innovative Forschung“ [55] im Bereich der Quantentechnologien werden.

Das gemeinsame Ziel mehrerer EU-Mitgliedsstaaten ist das Hinwirken auf die Etablierung einer „Quantum communication infrastructure“. Das Quantum Flagship soll dazu erhebliche Beiträge leisten [43]: die Intergration von Quantentechnologie in bestehende Kommunikationsnetzwerke lässt auf die Realisierung eines europaweiten Quanteninternets hoffen. Die Quantentechnologien werden längerfristig daher nicht nur in Wissenschaft und Industrie weiter an Bedeutung gewinnen, sondern insbesondere auch Einfluss auf das gesellschaftliche Leben nehmen.

In einer Zeit, in der quantenphysikalische Grundlagen zunehmend zu maßgeblichen technologischen, aber auch gesellschaftlichen Weiterentwicklung beitragen, ist der Quantenphysikunterricht an Schulen noch immer überwiegend geprägt von semiklassischen Modellen oder Effekten, wie dem Bohr'schen Atommodell oder dem Photoeffekt. Nicht selten wird die Quantenphysik mystifiziert, oft im Kontext der Gegenüberstellung eines Teilchen- und Wellencharakters von Quantenobjekten als unverstandenem Dualismus in Abgrenzung zur klassischen Physik - eine Sichtweise, die zu großen Teilen dem physikalischen Kenntnisstand um 1926 entspricht. Vor dem Hintergrund der aktuellen, aber auch zurückliegenden Entwicklungen im Bereich der Quantentechnologien kann diese jedoch nicht länger haltbar sein.

An diesem Punkt setzt diese Arbeit an: das hier vorgestellte und auf Grundlage fachdidaktischer Erkenntnisse zum Quantenphysikunterricht entwickelte Erlanger Unterrichtskonzept soll ein Angebot machen, um die oben beschriebene Kluft zwischen moderner

Quantenphysik und der an Schule vermittelten Quantenphysik zumindest ein wenig zu schließen. Das Ziel der Arbeit ist es also, den empirischen Nachweis dafür zu erbringen, dass

1. moderne quantenoptische Experimente - unterrichtstauglich eingebettet und dargestellt in einem didaktischen Konzept - durchaus dazu geeignet sind, Schülerinnen und Schüler der gymnasialen Oberstufe lernwirksam in die Quantenphysik einzuführen und, dass
2. mit Hilfe der Behandlung quantenphysikalischer Konzepte, wie der Präparation von Quantenzuständen oder der Antikorrelation am halbdurchlässigen Spiegel einerseits verbreitete Lernschwierigkeiten vermieden werden können und es andererseits gelingt, Lernenden quantenphysikalisch dominierte Vorstellungen auf hohem Niveau zu vermitteln.

Die Arbeit ist dazu in vier Teile gegliedert und die der Arbeit zugrundeliegende Systematik wird durch die folgende Abbildung visualisiert:

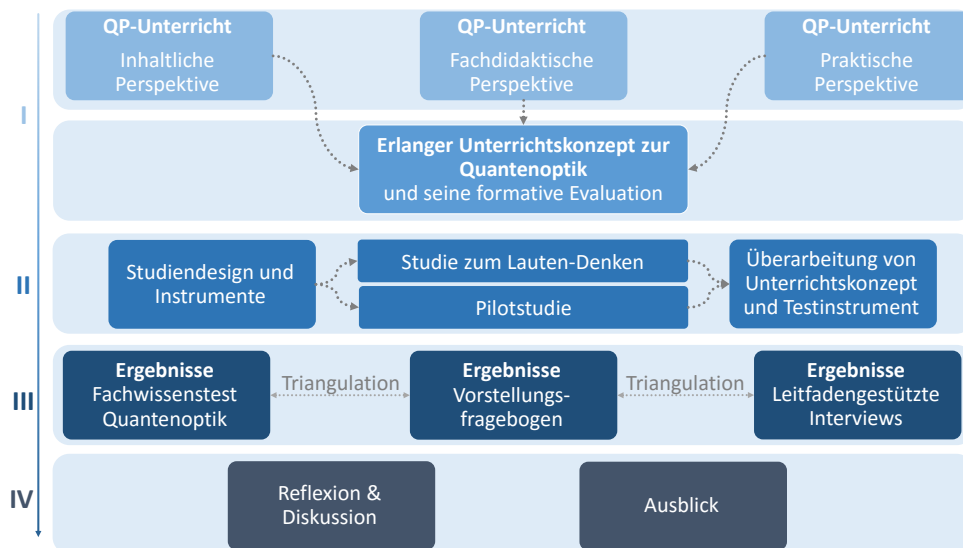


Abbildung 1: Aufbau der vorliegenden Arbeit.

Anhand aktueller Forschungsergebnisse zur Didaktik der Quantenphysik wird der Status Quo des Quantenphysikunterrichts beleuchtet. Es werden Befunde und Argumente aus der inhaltlichen und fachdidaktischen Perspektive genauso, wie aus der Sicht der Lehrenden und Lernenden zusammengetragen, um Anforderungen an ein neues Curriculum zur modernen Quantenphysik abzuleiten. Das aus diesen Anforderungen abgeleitete Unterrichtskonzept mit den zugrundeliegenden Begriffen und seiner Sachstruktur wird vorgestellt.

Die Entwicklung eines zeitgemäßen Curriculums alleine verspricht noch nicht unmittelbar dessen lernwirksamen Einsatz an Schulen. Im Mittelpunkt dieser Arbeit steht daher eine umfangreiche Evaluation des neu entwickelten Konzepts: bereits in einem recht frühen Stadium der Entwicklung wurde die dem Konzept zugrundeliegende Sachstruktur zunächst mit einzelnen Lernenden in einer Akzeptanzbefragung auf ihre Verständlichkeit

hin formativ überprüft. Die Ergebnisse der formativen Evaluation und die sich daraus ergebenden Konsequenzen für das Erlanger Unterrichtskonzept zur Quantenoptik werden in Kapitel 3 dieser Arbeit vorgestellt.

In Teil II wird eine summative Evaluation des Konzepts vorbereitet: die Forschungsfragen, das Studiendesign, die eingesetzten Testinstrumente (Eigenentwicklungen und übernommene Instrumente) sowie die Untersuchungsmethoden für die durchgeführte (explorative) Mixed-Methods-Studie werden detailliert vorgestellt (Kapitel 4). Außerdem wird die Pilotierung des neu entwickelten Testinstruments zur Erfassung deklarativen Wissens zur Quantenoptik mit einer Think-Aloud-Studie (Kapitel 5) und einer größer angelegten Pilotstudie mit angehenden Studierenden der Ingenieurwissenschaften sowie einer Expertenbefragung (Kapitel 6) berichtet.

Gegenstand von Teil III der Arbeit (Kapitel 7 - 13) werden nacheinander die Stichprobe und Auswertemethodik (Kapitel 7) und dann die Ergebnisse der summativen Evaluation mit folgenden Schwerpunkten sein (Kapitel 8-11):

- Kapitel 8: Einfluss der Einführung in die Quantenphysik mit Hilfe des Erlanger Konzepts auf affektive Lernermerkmale
- Kapitel 9: Untersuchung der Lernförderlichkeit des Konzepts in Bezug auf das deklarative Wissen in Quantenoptik
- Kapitel 10: Präsentation der Ergebnisse aus der Erhebung der Vorstellungen Lernender mit einem Vorstellungsfragebogen
- Kapitel 11: Daten aus einer Interviewstudie werden dargestellt und genutzt, um zusammenzufassen, welche Vorstellungen genau die Lernenden entwickelt haben, die mit Hilfe des Erlanger Konzepts in die Quantenphysik eingeführt wurden.

In Kapitel 12 führt die Triangulation der drei Erhebungsmethoden (Testinstrument zum deklarativen Wissen, Vorstellungsfragebogen und Leitfadeninterviews) im Bezug auf ausgewählte inhaltliche Aspekte der Quantenphysik zu einem detaillierteren Bild über den Lernerfolg. Die Darstellung der Ergebnisse zur summativen Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts wird in Kapitel 13 mit der Perspektive der Lehrkräfte abgerundet, die das Konzept als weitgehend praxistauglich bewerten.

Teil IV mit den Kapitel 14 und 15 stellt den Abschluss der Arbeit dar: die methodischen Grenzen der berichteten Studie werden zunächst einer kritischen Reflexion unterzogen, um im Anschluss vor diesem Hintergrund die zentralen Ergebnisse mit Bezug auf die Forschungsfragen zu diskutieren (Kapitel 14). Ein Ausblick auf mögliche Folgeforschung wird in Kapitel 15 gegeben.

Insgesamt zeigt sich: Schülerinnen und Schüler gelangen mit Hilfe des Konzepts zu quantenphysikalisch zeitgemäßen Vorstellungen und sind gegenüber einer am Experiment orientierten Einführung in die Quantenphysik nicht voreingenommen. Klassisch-mechanistische Vorstellungen sind bei so unterrichteten Schülerinnen und Schülern nur selten feststellbar.

Teil I

Quantenphysik lehren

KAPITEL 1

Didaktik der Quantenphysik: Ausgewählte Forschungsergebnisse und Anforderungen an ein neues Curriculum

„Das große Ziel der Wissenschaft ist es, die größte Anzahl empirischer Tatsachen durch logische Herleitung aus der kleinsten Anzahl von Hypothesen und Axiomen zu erfassen.“

- Albert Einstein

Einordnung in den Kontext der Arbeit

In diesem Kapitel sollen ausgewählte Ergebnisse der fachdidaktischen Forschung zur Quantenphysik bezogen auf vier Schwerpunkte vorgestellt werden: Zunächst soll der Ist-Zustand des Quantenphysikunterrichts an Schulen dargestellt werden, dann wird auf Unterrichtsvorschläge eingegangen, die aus der fachdidaktischen Forschung zur Quantenphysik hervorgegangen sind und schließlich wird die Sicht von Lehrkräften und Lernenden auf den Unterricht zur Quantenphysik beleuchtet. Aus der jeweiligen Perspektive wird vor dem Hintergrund der theoretischen Darstellung eine Anforderung an ein neues Curriculum zur Quantenphysik abgeleitet. Diese Anforderungen münden dann in der Entwicklung des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik, welches in Kapitel 2 vorgestellt wird.

In den folgenden Abschnitten werden vier Perspektiven auf die Vermittlungen von Quantenphysik an Schulen beleuchtet. Die inhaltsdidaktische Perspektive wird dargelegt, um den Status Quo der im Quantenphysikunterricht standardmäßig vermittelten Inhalte herauszuarbeiten. Ein Blick auf die fachdidaktische Perspektive gibt einen Überblick

über bestehende Unterrichtskonzepte zur Quantenphysik, ihre Schwerpunktsetzungen und verbreitete Schülervorstellungen. Die Lehrenden- und Lernendenperspektive deckt einen Bedarf an praxistauglichem Arbeitsmaterial zur Quantenphysik auf und zwar mit Schwerpunkt auf experimentellen Ergebnissen. Aus diesen vier Perspektiven werden Anforderungen abgeleitet, die der Entwicklung eines neuen Unterrichtskonzepts zur Quantenphysik zugrunde liegen und dieser Arbeit so einen theoretischen Rahmen verleihen.

1.1 Quantenphysikunterricht heute: inhaltliche Perspektive

Die Quantenphysik bietet diverse Anknüpfungspunkte zur Vermittlung einer übergeordneten Perspektive auf Naturwissenschaften [214, S. 12]. Im Physikunterricht wird das Ziel verfolgt, den Schülerinnen und Schülern das naturwissenschaftliche Grundwissen zu vermitteln, um ihnen damit eine „Orientierungshilfe“ in einer „hochtechnisierten Welt“ zu geben [194]. Diese Anforderung an den Physikunterricht scheint bei den Bemühungen der Europäischen Union, die die Beforschung von Quantentechnologien in den nächsten zehn Jahren mit dem Quantum-Flagship besonders stärken und ein europaweites „Quanteninternet“ einrichten will, aktueller denn je [43]. Schon in mittelfristiger Zukunft werden Quantentechnologien damit nicht nur in Wissenschaft und Industrie diskutiert, sondern auch ganz direkten Einfluss auf das gesellschaftliche Leben haben. Vor diesem Hintergrund scheint die Frage danach, welche Inhalte zur Quantenphysik den Jugendlichen an Gymnasien heute vermittelt werden und ob diesen damit tatsächlich eine, wie oben festgehalten, Orientierungshilfe in einer technisierten Welt gegeben werden kann, von zentraler Bedeutung.

Zwei aktuelle Forschungsarbeiten diskutierten Fragen dieser Art: Stadermann et al. leiteten aus einer umfangreichen Durchsicht von nationalen Physikcurricula an Gymnasien ein Kerncurriculum ab und fassten damit in ihrem Papier von 2019 den inhaltlichen Status-Quo zum heutigen Quantenphysikunterricht zusammen [195]. In einer anderen Arbeit von 2018 gingen Krijtenburg-Lewerissa et al. mit Hilfe einer Delphi-Studie der Frage nach, welche Themen der Quantenphysik aus Sicht von Experten im Quantenphysikunterricht an Gymnasien vermittelt werden sollten [108]. Diese beiden Forschungsarbeiten sollen hier ausführlicher vorgestellt werden, um ein umfassendes Bild darüber zu zeichnen, wie Quantenphysikunterricht heute aus inhaltlicher Sicht überwiegend aussieht.

„Analysis of secondary school quantum physics curricula of 15 different countries: Different perspectives on a challenging topic“¹. Stadermann et al. durchsuchten fachdidaktische Literatur zur Quantenphysik, um offizielle Lehrplandokumente verschiedener Nationen ausfindig zu machen, in denen die Quantenphysik curricular verankert ist. Aus der umfangreichen Literaturrecherche extrahierten sie 37 aktuelle Lehrplandokumente aus 15 Nationen. Sie kategorisierten die in diesen Dokumenten festgeschriebenen Themen im Quantenphysikunterricht zu 17 Items, welche von Schwarzkör-

¹Sämtliche Informationen dieses Abschnitts entspringen dem hier genannten Artikel [195]. Anderweitig in die Ausführungen einbezogene Literatur wird separat gekennzeichnet.

1.1. QUANTENPHYSIKUNTERRICHT HEUTE: INHALTLICHE PERSPEKTIVE

perstrahlung über den Welle-Teilchen-Dualismus bis hin zur Schrödinger-Gleichung reichen. Mittels einer Häufigkeitsanalyse untersuchten sie, in wie vielen nationalen Schulcurricula die jeweiligen Inhalte festgeschrieben sind, die sich den jeweiligen Items zuordnen lassen. Items, die in mindestens acht der 15 Nationen curricular verankert sind, führten die Autoren zu einem internationalen Kerncurriculum zusammen.

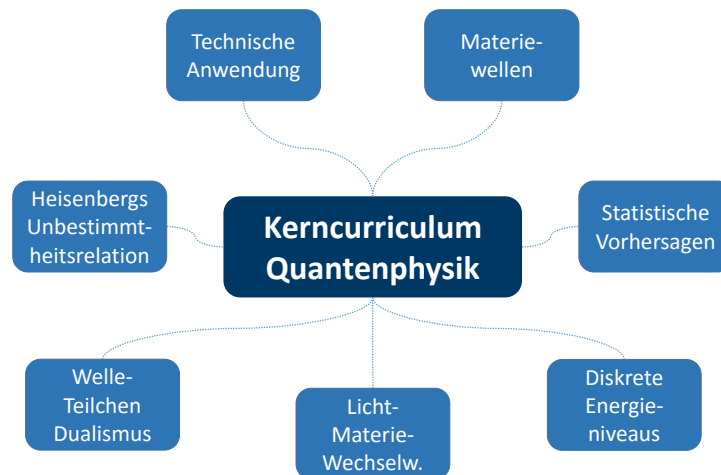


Abbildung 1.1: Kerncurriculum zur Quantenphysik, wie es sich aus der Literaturrecherche in [195] ergab.

Der Welle-Teilchen-Dualismus wird in allen 15 Nationen im Curriculum zum Quantenphysikunterricht vorgesehen, genauso wie die diskreten atomaren Energieniveaus. Dem Item *Licht-Materie-Wechselwirkung* werden nach Angaben der Autoren primär solche Textstellen in den Curriculumsdokumenten zugeordnet, die die Behandlung des Fotoeffekts festlegen. In 13 der 15 Nationen findet man solche Textstellen.

Stadermann et al. folgern aus ihrer Untersuchung, dass die Quantenphysik an Schulen häufig mit historischen Experimenten eingeführt wird und üben durchaus Kritik an diesem Ansatz: Sie bezeichnen diesen Zugang als *quasi-historisch* und meinen damit, dass Schulbücher den eigentlichen historischen Gang der Erkenntnisgewinnung oft nur stark vereinfacht darstellen. Dies geschieht dann beispielsweise so, dass der Fotoeffekt als ein von Einstein auf „brillianten Weise erklärter“ Effekt eingeführt wird [195], mit dem die Quantenphysik begründet gewesen wäre. Themen, wie das der diskreten Energieniveaus oder der Fotoeffekt können semiklassisch beschrieben oder erklärt werden und seien nicht geeignet, das Verständnis der Schülerinnen und Schüler für Quantenphysik zu stärken. Die historischen Aspekte der Quantenphysik, die die Curricula nachwievor dominieren und der Dualismusbegriff als Ausdruck einer Gegenüberstellung (scheinbar) widersprüchlicher Theorien bzw. Modelle stellen den Stand der physikalischen Diskussion um 1926 dar [120]. Erst moderne Entwicklungen - sowohl experimenteller als auch theoretischer Natur - haben zu einer veränderten Sichtweise auf die Quantenphysik geführt. Besonders die Ergebnisse aus Experimenten mit einzelnen Quantenobjekten, die nicht semiklassisch erklärbar sind, wie zum Beispiel der Nachweis von Antibunching [95] oder die gleichzeitige Demonstration der Antikorrelation einzelner Photonen am halbdurchlässigen Spiegel und der Einzelphotoneninterferenz [69], waren dafür verantwortlich [144]. In ihrer Schluss-

folgerung betonen Stadermann und Kollegen, dass in den Curricula einiger Länder auch moderne Inhalte der Quantenphysik zu finden waren, etwa die Verschränkung und ihre Anwendungen. In diesem Kontext sprechen die Autoren einen wichtigen Aspekt an: es kann ein Ansatz sein, Schülerinnen und Schüler die besagten historischen Entwicklungen, die den Physikern in der ersten Phase der Entwicklung der Quantenphysik bekanntermaßen Schwierigkeiten bereitet haben, zu ersparen. Sie fordern abschließend, dass solche direkten Zugänge aus didaktischer Sicht zu untersuchen sind. Wir kommen auf diesen Vorschlag später zurück, wollen vorher aber noch eine andere aktuelle Forschungsarbeit vorstellen.

„**Key topics for quantum mechanics at secondary schools: a Delphi study into experts opinions**“². Krijtenburg-Lewerissa et al. berichten in ihrem Artikel die Ergebnisse einer Delphi-Studie mit drei Befragungsrunden. Mit dieser wurde das Ziel verfolgt, herauszufinden, welche Themen der Quantenphysik aus Sicht von Expertinnen und Experten aus der Fachwissenschaft an Gymnasien unterrichtet werden sollten. Besonderer Fokus lag dabei auf solchen Themen, die zur Förderung von *scientific literacy*³ geeignet sind.



Die **Delphi-Methode** ist eine Untersuchungsmethode, die zur Ermittlung von Expertenmeinungen eingesetzt werden kann [40]. Dabei wird in mehreren sukzessiven Runden gearbeitet: Ergebnisse einer Befragungsrunde werden Teilnehmenden der nächsten Iteration in kondensierter Form präsentiert, damit diese bewertet oder kommentiert werden können. Jede Befragungsrunde hat damit also unmittelbaren Einfluss auf die Nächste, indem den Probandinnen und Probanden Informationen über bisherige Ergebnisse bereitgestellt werden [73].

An der ersten Befragungsrunde nahmen $N_1 = 17$ Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus Physik, Mathematischer Physik, Chemie und Biophysik teil. Insgesamt nannten die Experten 89 verschiedene Themen; unter den am häufigsten genannten Themen für den Quantenphysikunterricht waren dabei Spektrallinien (16 Nennungen), der Tunneleffekt (12 Nennungen), der Fotoeffekt (11 Nennungen), die Wahrscheinlichkeitsdeutung der Quantenphysik (11 Nennungen) oder etwa der Welle-Teilchen-Dualismus (11 Nennungen).



Eine genauere Beschreibung, was genau die Expertinnen und Experten oder die Autoren der Arbeit unter den einzelnen Begriffen im Kontext der Untersuchung genau verstanden, wird leider nicht geklärt. Während das bei Fachbegriffen, wie Wellenfunktion, klar sein mag, ist dies bei Begriffen, wie etwa dem Welle-Teilchen-Dualismus weniger offensichtlich. Dies muss bei der Bewertung der Ergebnisse mitbedacht werden.

²Sämtliche Informationen dieses Abschnitts entspringen dem hier genannten Artikel [108]. Anderweitig in die Ausführungen einbezogene Literatur wird separat gekennzeichnet.

³Die Autoren bezogen sich beim Begriff *scientific literacy* auf zwei Sichtweisen, die sie von [84] übernahmen: 1. Zentrale Aspekte von Wissenschaft, über die alle Menschen bescheid wissen sollten und 2. auf Wissenschaft bezogenes Wissen und Fähigkeiten, die für ein Teilhaben am gesellschaftlichen Leben notwendig sind.

1.1. QUANTENPHYSIKUNTERRICHT HEUTE: INHALTLICHE PERSPEKTIVE

In Runde zwei sollten die $N_2 = 12$ Expertinnen und Experten solche Themen aus den 89 genannten Themen in Runde eins mit Begründung auswählen, die sie für besonders wichtig erachten. Nach dieser Runde verblieben noch 37 Themen, die die Autoren in drei Kategorien zusammenfassten: *Konzepte*, *Beispiele* und *Anwendungen*.

Die 37 verbliebenen Themen sortierten die $N_3 = 11$ Expertinnen und Experten der dritten Befragungsrunde den drei Kategorien Konzepte, Beispiele und Anwendungen zu und sortierten die Themen innerhalb der Kategorien nach Wichtigkeit. Die Autoren folgerten aus den Ergebnissen der dritten Befragungsrunde schließlich die drei folgenden zentralen Schwerpunkte, die den Expertinnen und Experten besonders wichtig waren:

1. Dualismus: Welle-Teilchen-Dualismus, Teilchencharakter des Lichts, De-Broglie-Wellenlänge, Heisenbergs Unbestimmtheitsrelation, das Doppelspaltexperiment und den Photoeffekt.
2. Wellenfunktionen: Wellenfunktion ψ , Wahrscheinlichkeitsdeutung und den eindimensionalen Potentialtopf.
3. Atome: Energieniveaus, Quantisierung, Atomstruktur, Spektrallinien, Wasserstoffatom und Periodensystem.

Dabei betonen die Autoren, dass die Begründungen für den Ausschluss einiger dieser Themen in Runde drei durch die Expertinnen und Experten meist nicht inhaltlicher Natur waren. Vielmehr be-

schrieben viele der Befragten die unberücksichtigt gebliebenen Themen als zu komplex oder abstrakt für den Unterricht an Schulen. Krijtenburg-Lewerissa et al. führen in ihren Schlussfolgerungen aus, dass für die Zukunft nicht nur erforschenswert ist, welche Themen aus Expertensicht im Quantenphysikunterricht an Schulen zu behandeln sind, sondern dass insbesondere Einsichten gewonnen werden müssen, welche Themen auf

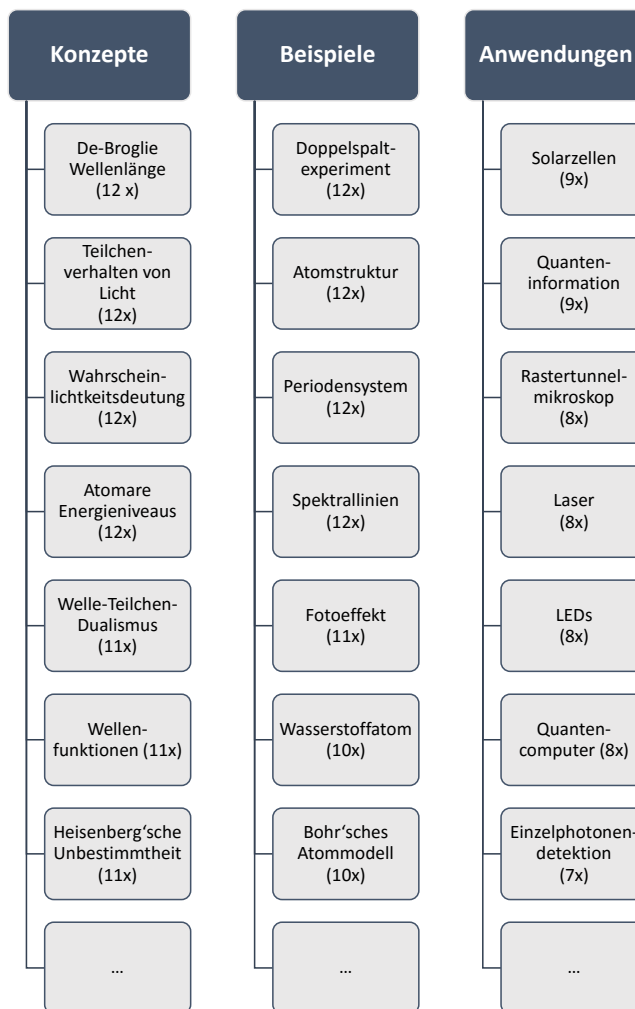


Abbildung 1.2: Einblick in die von den Befragten ausgewählten Themen und die von den Autoren der Arbeit vorgenommene Kategorisierung dieser Themen mit Häufigkeit der Nennung. Eigene Darstellung nach [108].

1.1. QUANTENPHYSIKUNTERRICHT HEUTE: INHALTLICHE PERSPEKTIVE

dem Niveau des Gymnasiums überhaupt vermittelt werden können: „Therefore, there is a need for practice-based research into students' understanding of quantum mechanics, in which the feasibility of teaching the various subtopics of quantum mechanics to secondary school students is investigated“ [108].

Schlussfolgerungen aus den beiden Forschungsarbeiten Beide Forschungsarbeiten ähneln sich in zwei zentralen Punkten:

1. Der Quantenphysikunterricht ist heute überwiegend durch historische Zugänge und Themen geprägt. Semiklassisch erklärbare Effekte, wie der Fotoeffekt und der Welle-Teilchendualismus sind Key-Items des heutigen Quantenphysikunterrichts und werden auch von Fachexpertinnen und -experten als solche gesehen.
2. Es gibt eine Forderung, verschiedene Themen der Quantenphysik dahingehend zu untersuchen, inwiefern sie mit Schülerinnen und Schülern an Gymnasien unterrichtet werden können. Stadermann et al. sprechen dazu explizit die Verschränkung an und weisen auf die Möglichkeit hin, auf (quasi-)historische Zugänge im Quantenphysikunterricht künftig zu verzichten. Krijtenburg-Lewerissa et al. bleiben unspezifischer, fordern aber auch Untersuchungen zu verschiedenen Themen der Quantenphysik an Schulen, um Einblicke in Lernschwierigkeiten oder benötigtes Vorwissen zu erhalten.

Obwohl Lewerissa-Krijtenburg et al. in ihrer Delphi-Studie vor allem Themen als Ergebnis erhalten, die auch im Kerncurriculum von Staderman et al. enthalten sind, also schon weitgehend im Quantenphysikunterricht etabliert zu sein scheinen, zeigen insbesondere die Befragungsergebnisse der zweiten Runde, dass Expertinnen und Experten durchaus auch diverse weitere Themen der modernen Quantenphysik als wichtig für den gymnasialen Quantenphysikunterricht erachten. So werden etwa die Themen Quanteninformation, Quantencomputer oder Einzelphotonendetektoren von mehr als der Hälfte der Befragten in Runde zwei genannt. Stadermann et al. schreiben beispielsweise zur Verschränkung:

„Some of these 'unusual' items might be seeds that grow bigger and might appear in a larger number of national curriculum documents over time“ [195, S. 15]

und schränken ein:

„Certainly, it is unrealistic to expect surprising curriculum innovations in most countries, because developing and changing national standards is generally a complex and slow process which often involves different stakeholders“ [195, S. 15].

Allerdings ist die Forderung der unterrichtlichen Einbindung moderner Erkenntnisse der Quantenphysik weit über den Welle-Teilchen-Dualismus hinaus keinesfalls neu. Bereits 1981 formulierte Simonsohn aus fachdidaktischer Sicht dazu:

„Denken wir dabei - wie es sich gehört - bei der Schule vor allem an diejenigen, die nicht Physiker werden. Viele nehmen den sogenannten Dualismus mit ins Leben - und die Physik ist doch längst darüber hinaus“ [192].

Ableitung einer Anforderung an ein neues Curriculum zur Quantenphysik aus inhaltlicher Sicht: Vor dem Hintergrund jüngster Entwicklungen und Initiativen, wie dem Quantum-Flagship auf Ebene der Europäischen Union, scheint der Einbezug moderner Quantenphysik in den Schulunterricht also an der Zeit. Es muss - wie die beiden vorgestellten Arbeiten richtigerweise anführen - empirisch überprüft werden, inwiefern moderne Themen der Quantenphysik an Schulen vermittelt werden können. Dies ist nicht zuletzt notwendig, damit der Quantenphysikunterricht dem eingangs vorgestellten Anspruch gerecht werden kann, als Orientierungshilfe in einer technisierten Welt zu fungieren. Es muss empirisch überprüft werden, ob und wie Schülerinnen und Schüler in die Quantenphysik eingeführt werden können, damit diese anschlussfähiges Wissen entwickeln für die Vermittlung grundlegender Aspekte von Quantentechnologien. Dabei kann ein Abweichen von historischen Zugänge zur Quantenphysik, wie auch Stadermann et al. vorschlagen, ein probates Mittel sein und dieser Denkanstoß ist keines falls neu: Bereits in einer Arbeit von Brachner und Fichtner aus den 1970er Jahren liest man:

„Die Ursache des Dilemmas ist unschwer zu finden: Die Schulphysik beschreibt Inhalte moderner Technologien mit den hierfür unzureichenden Modellen und Begriffen der klassischen Physik. Damit trägt sie alle unnötigen Widersprüche und Schwierigkeiten in die Schule, mit denen selbst die hervorragenden Physiker der halbklassischen Epoche [...] zu kämpfen hatten, weil sie die Ursachen dieser Schwierigkeiten noch nicht voll aufgedeckt hatten. Ist es sinnvoll, [...] diese Erkenntnisumwege (Dualismus etc.) als Facit unserer Bemühungen um Naturerkenntnis lernen zu lassen?“ [20]

Als Anforderung an ein neues Curriculum zur Quantenphysik halten wir daher fest:



Moderne Erkenntnisse zur Quantenphysik sollen Einkehr in den Schulunterricht finden, um Schülerinnen und Schülern einen Einblick in Quantentechnologien zu ermöglichen, die in ihrem Alltag heute und in Zukunft vorkommen.

1.2 Fachdidaktische Perspektive: Unterrichtskonzepte und Lernendenvorstellungen zur Quantenphysik

Die Beforschung von Schülervorstellungen zur Quantenphysik hat mittlerweile eine lange Tradition in der Fachdidaktik Physik und es sind zahlreiche Unterrichtsvorschläge zur Quantenphysik an Schulen vorgestellt worden. In diesem Abschnitt geben wir einen Überblick über ausgewählte Schülervorstellungen Lernender zur Quantenphysik und über die entwickelten Lehrgänge für Schulen. Einen umfassenden Überblick über den aktuellen Stand der fachdidaktischen Forschung gibt auch das 2017 erschienene Review [107].

1.2.1 Ausgewählte Lernendenvorstellungen zur Quantenphysik

Eine umfassende Darstellung über den Stand der Schülervorstellungsforschung in der Quantenphysik gibt Ubben in seiner Arbeit, auf die insbesondere für die detaillierte Beschreibung der einzelnen Studien verwiesen sei [207]. An dieser Stelle sollen lediglich

1.2. FACHDIDAKTISCHE PERSPEKTIVE: UNTERRICHTSKONZEPTE UND LERNENDENVORSTELLUNGEN ZUR QUANTENPHYSIK

einige der wichtigsten Vorstellungen Lernender zur Quantennatur des Lichts, zur Eigenschaft Ort in der Quantenphysik und zur Wahrscheinlichkeitsdeutung zusammengefasst werden. Dies geschieht einerseits um einen Überblick über den aktuellen Kenntnisstand zu Lernendenvorstellungen in der Quantenphysik zu geben, und andererseits um das immer wieder beobachtete Verharren von Lernenden in mechanistischen Denkweisen aufzuzeigen.

Lernendenvorstellungen zur Natur des Lichts: Untersuchungen zur Natur des Lichts beziehen sich in aller Regel auf den Dualismus von Wellen und Teilchen. Eine Interviewstudie von 2011 [6] mit $N = 25$ Studierenden führte auf drei Vorstellungskluster, die die Autoren folgendermaßen betitelten und beschrieben:

- Classical description: Objekte werden entweder als Wellen oder als Teilchen im klassischen Sinn beschrieben. Teilchen werden dabei als lokalisierte, kompakte Objekte beschrieben, visualisiert „as a billiard ball which carries energy and momentum“ [6, S. 6].
- Mixed description: Photonen werden als Objekte mit den Eigenschaften klassischer Teilchen und Wellen betrachtet.
- Quasiquantum description: Darstellungen der Lernenden entsprechen überwiegend dualistischen Vorstellungen, allerdings wird mitunter darauf zurückgegriffen, Quantenobjekte als entweder Wellen oder Teilchen zu betrachten.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung decken sich weitgehend mit vorherigen Ergebnissen, unter anderem von [89, 90, 120, 127]. Ireson [89] führte beispielsweise basierend auf einer Befragung von $N = 225$ Zweitsemesterstudierenden eine multivariate Analyse zu deren Verständnissen der Quantenphysik durch und gruppierte die Probandinnen und Probanden nach ihren Vorstellungen zu den drei Clustern *mechanistisches Denken*, *Zwischendenken* und *Quantendenken*. Als weiteres Beispiel eignen sich die Forschungsergebnisse von Lichtfeldt [121]: bereits 1992 wurden Untersuchungen zu Schülervorstellungen über Quantenphysik in 14 Berliner Grund- und Leistungskursen vor und nach dem Quantenphysikunterricht durch. Vor dem Unterricht konnten dabei bei 43% der Schülerinnen und Schüler eine reine Wellenvorstellung des Lichts festgestellt werden, während bei 7.3% der Befragten reine Teilchenvorstellungen festgestellt wurden. 40% vertraten eine dualistische Auffassung. Schülerinnen und Schüler wurden dem Cluster dualistischer Denkweisen zugeordnet, wenn beispielsweise Aussagen im Sinne der folgenden fielen:

- Licht ist eine Energieform, die einerseits Eigenschaften von Wellen aufweist, andererseits aber auch die von kleinsten Teilchen.
- Licht besteht aus Strahlen, Wellen und Quanten.

Während die erste Aussage wohl in der Tat als dualistische Vorstellung zum Licht aufzufassen ist, entspricht die zweite Vorstellung einer typischen Hybridvorstellung, wie sie auch [157] in seiner 2015 publizierten Arbeit zu Vorstellungen zur Natur des Lichts unter türkischen Physikstudierenden berichtet: eine häufige Schwierigkeit ist demnach die Vermischung verschiedener Modellvorstellungen, wie beispielsweise die von Photonen als sich entlang sinusförmiger Bahnen bewegendes kugelförmiges Teilchen.



Hybridmodelle sind, wie im Übersichtsartikel zur Modellierung in der Physik von [138] beschrieben, gekennzeichnet durch die Vermengung von Realitäts- und Modellebene, um beim Beispiel Licht zu bleiben etwa „Licht besteht aus Strahlen“. Oft sind sie auch gekennzeichnet durch die fehlende Differenzierung zwischen verschiedenen Modellvorstellungen, wie zum Beispiel „Photonen sind die Bestandteile des Lichts, die sich auf Wellen ausbreiten“ [131]. Solche Hybridvorstellungen sind in der Quantenphysik besonders verbreitet, beispielsweise auch im Zusammenhang mit Atommodellen [207, S. 167].

Lernendenvorstellungen zur Lokalisierung von Quantenobjekten: Bethge befragte $N = 142$ Schülerinnen und Schüler der gymnasialen Oberstufe mit Hilfe eines Fragebogens, wobei er zusätzlich 25 der Befragten interviewte. Das zentrale Ergebnis dieser Untersuchungen war, dass Trajektorienvorstellungen zu Quantenobjekten beim Vorverständnis Lernender eine besondere Bedeutung zukommt. Zwei Gruppen von Schülerinnen und Schülern konnte Bethge unterscheiden: „Es konnte [...] von einer Gruppe gesprochen werden, die sowohl Aussehen und Funktion des Bahnbegriffs bei der Weiterentwicklung mentaler Atommodelle aufgab, und von einer Gruppe, die nur die Funktionalität (Bahn-bewegung) aufgab aber das Aussehen beibehielt“, so Ubben zu den Ergebnissen dieser Untersuchung [207, S. 24]. Genauere Untersuchungen zu Lernendenvorstellungen einer permanenten Lokalisierung von Quantenobjekten führte Wiesner durch [220]. Wiesner findet die folgenden Vorstellungen Lernender zur Eigenschaft Ort, die in der Arbeit von Müller ausführlich zur Übersicht gestellt sind [143, S. 23]:

1. Quantenobjekte sind permanent lokalisiert: Schülerinnen und Schüler, die dieser Ansicht waren, konnten folgenden Clustern zugeordnet werden:
 - (a) Objektpermanenz: 24% der Befragten ordnen Quantenobjekten einen permanenten Ort zu mit der Begründung, dass sie schließlich irgendwo sein müssten.
 - (b) Praktische Schwierigkeiten bei der Ortsbestimmung: Quantenobjekte sind permanent lokalisiert, aber eine Bestimmung des Orts ist messtechnisch anspruchsvoll. Dieser Meinung waren 16% der Lernenden.
 - (c) Ortsangabe möglich, wenn auf die Impulsangabe verzichtet wird. 12% der Lernenden diskutieren die Lokalisierbarkeit von Quantenobjekten vor dem Hintergrund der Heisenberg'schen Unbestimmtheitsrelation und sind der Meinung, dass es prinzipiell einen Ort gibt.
 - (d) Stetigkeit der Bewegung: Schülerinnen und Schüler, die diesem Cluster zugeordnet sind, argumentieren damit, dass Quantenobjekte, die an unterschiedlichen Orten erzeugt oder detektiert werden, dazwischen einer kontinuierlichen Bahn folgen. 4% der Befragten gehören dieser Unterkategorie an.
2. Quantenobjekten kann keine (permanente) Ortseigenschaft zugeschrieben werden:
 - (a) Indifferente Bedenken: 12% der Befragten wissen dies zwar, äußern aber Unbehaglichkeiten
 - (b) Ort kann wegen Störung des Zustandes nicht gemessen werden: 12% der Befragten äußern solche Vorstellungen

- (c) Verweis auf die Unbestimmtheitsrelation: 8% der Lernenden
- (d) Dualismus: Quantenobjekte können als Wellen aufgefasst werden. Weil Wellen nicht im klassischen Sinn lokalisiert werden können, gilt dies auch für Quantenobjekte. 8% der befragten Schülerinnen und Schüler äußerten solche Gedanken.
- (e) Quantenobjekte haben keine scharfe räumliche Abgrenzung und sind somit nicht permanent Lokalisierbar denken 4% der Befragten.
- (f) Weitere 4% der Schülerinnen und Schüler sprechen sich gegen die permanente Lokalisierung von Elektronen aus, weil diese zerstrahlen könnten.

Lernendenvorstellungen zur Wahrscheinlichkeitsdeutung: Am Beispiel einzelner Photonen am halbdurchlässigen Spiegel zeigt sich der statistische Charakter der Quantenphysik einfach und deutlich. Während man für das einzelne Photon nicht vorhersagen kann, ob es beim Detektor am reflektierten oder am transmittierten Ausgang detektiert wird, lässt sich für die Betrachtung vieler solcher Versuchsdurchführungen eine Prognose machen: es wird sich eine Gleichverteilung zwischen reflektiert und transmittiert einstellen. Der zentrale Unterschied zur klassischen Physik liegt in der Objektivität des Zufalls in der Quantenphysik. Das Fallen lassen deterministischer Vorstellungen ist für Lernende eine große Hürde, wie Müller bei [175, S. 214f] schreibt. In der bereits oben zitierten Studie von Bethge, die in den Arbeiten [207, 143] genauer erläutert ist, konnten drei Antwortkategorien Lernender zur Wahrscheinlichkeitsdeutung gefunden werden (vgl. [143, S. 19f]):

1. Wahrscheinlichkeit als Interpretations- oder Übersetzungskalkül: Schülerinnen und Schüler nutzen relative Häufigkeiten und Wahrscheinlichkeiten, um Phänomene der Quantenphysik beschreiben zu können.
2. Unzufriedenheit mit der akasalen Beschreibung durch Wahrscheinlichkeiten: Schülerinnen und Schüler haben Schwierigkeiten, deterministische Vorstellungen fallen zu lassen und verharren stattdessen in der Suche nach kausalen Zusammenhängen bei der Erklärung quantenphysikalischer Phänomene. Dies zeigt sich etwa bei der Frage, ob mit zusätzlichen Informationen nicht doch vorhergesagt werden könnte, ob ein Photon am halbdurchlässigen Spiegel reflektiert oder transmittiert wird.
3. Wahrscheinlichkeit als Ungenauigkeit: Schülerinnen und Schüler, die dieser Kategorie zugeordnet sind, verstehen Wahrscheinlichkeitsaussagen in der Quantenphysik primär im Kontext von fehlerbehafteten Aussagen, z.B. anhand von Messungen.

Ableitung einer Anforderung an ein neues Curriculum zur Quantenphysik anhand von Schülervorstellungen: Zu allen Themen der Quantenphysik findet man klassisch geprägte Vorstellungen, wie bereits eingangs zitiert. Schülerinnen und Schüler nutzen oft mechanistische Denkweisen als Basis zur Erklärung quantenphysikalischer Phänomene. Diese erschweren den Aufbau quantenphysikalisch geprägter Vorstellungen [146]. Eine Möglichkeit, solche mechanistischen Denk- und Sprechweisen zu umgehen, ist es, die Quantenphysik nicht aus der Mechanik zu entwickeln. Ein Verzicht auf das

Sprechen über klassische Wellen und Teilchen könnte die Ausprägung berichteter Hybridvorstellung eindämmen. Stattdessen mag die Betonung zentraler Begriffe der Quantenphysik, wie die Präparation, geeignet sein die Quantenphysik - nun losgelöst von der Mechanik - zu entwickeln und somit verbreitete Lernschwierigkeiten zu vermeiden. Als Anforderung an ein neues Curriculum zur Quantenphysik halten wir daher fest:



Die Quantenphysik wird, wie in den dargestellten Literaturempfehlungen begründet, nicht als Erweiterung der klassischen Mechanik formuliert. Insbesondere sind mechanistische Sprechweisen und die Diskussion eines Welle-Teilchen-Dualismus im naiven Sinne zu verhindern, um adäquate Vorstellungen zur Eigenschaft „Ort“ in der Quantenphysik zu vermitteln. Eine gewinnbringende Alternative kann in der Vermittlung einer Idee von der Präparation in der Quantenphysik liegen.

1.2.2 Unterrichtskonzepte zur Quantenphysik

In der physikdidaktischen Forschung zur Lehre der Quantenphysik gibt es mittlerweile eine fortwährende Tradition in der Entwicklung von Unterrichtskonzepten oder Lernhilfen. Eine Kategorisierung der existierenden Konzepte stellen Müller und Wiesner nach folgender Schwerpunktsetzung dar [145, S. 7ff]⁴:

1. **Quantenphysikalischer Formalismus (QF):** „Unterrichtskonzepte, die sich besonders auf die Prinzipien des quantenphysikalischen Formalismus konzentrieren (z.B. Feynman-Zeiger) und diese auf verschiedene Fragestellungen anwenden,“
2. **Begriffliche Fragestellungen (BF):** „Unterrichtskonzepte, deren Schwerpunkt auf den begrifflichen Fragestellungen der Quantenphysik liegt,“
3. **Quantenphysik als Basis physikalischer Theorien (QBT):** „Unterrichtskonzepte, in denen die Quantenphysik als Basis für das Verständnis zahlreicher physikalischer Theorien (z.B. Atomphysik, Kernphysik, Teilchenphysik, Festkörperphysik) begriffen wird,“
4. **Quantenphysik als Grundlage technologischer Anwendungen (QGA):** „Unterrichtskonzepte, in denen sie als Grundlage für zahlreiche technologische Anwendungen (z.B. Transistor, Laser) wichtig ist.“

Weber sortiert in seiner Arbeit einzelne Unterrichtskonzepte der Quantenphysik in die einzelnen Kategorien ein und zeigt damit auf, dass diese vielfältig sind und überwiegend disjunkt nebeneinander stehen [214, S. 13]. Gemein ist den meisten der Konzepte nach [214], dass belastbare empirische Ergebnisse zur Lernwirksamkeit der Unterrichtskonzeptionen fehlen. Einzig das Münchner Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik wurde von Müller umfassend empirisch untersucht [143].

⁴In seine Ausführungen bezieht Müller auch historische Zugänge mit ein und nennt dabei Kuhn als einen wichtigen Repräsentanten [111].

1.2. FACHDIDAKTISCHE PERSPEKTIVE: UNTERRICHTSKONZEPTE UND LERNENDENVORSTELLUNGEN ZUR QUANTENPHYSIK

| | QF | BF | QBT | QGA |
|---|----|----|-----|-----|
| Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik [143] | × | × | | |
| Bremer Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik [150] | | | × | |
| Konzepte mit dem Zeigerformalismus [8] | × | | | |
| Visual Quantum Mechanics [229] | | | | × |
| Quantendimensionen [79] | | × | | |
| The Quantum Mechanics Visualisation Project [100] | | × | | |
| Sum over Paths Approach [126] | × | | | |

Tabelle 1.1: Einordnung der Unterrichtskonzepte und Lernhilfen zur Quantenphysik in die Kategorien nach Müller und Wiesner in Anlehnung an [214], erweitert um „The Quantum Mechanics Visualisation Project“ und den „Sum over Paths Approach“.

Eine detaillierte Übersicht über die genauen Inhalte und Ziele der einzelnen Unterrichtskonzepte findet man bei [214]. Bei all den inhaltlich diversen Unterrichtskonzepten zur Quantenphysik ist mittlerweile ein Konsens darüber festzustellen, dass die Quantenphysik an Schulen primär qualitativ zu unterrichten ist. Um mit begrifflicher Klarheit die Unterscheidung zwischen klassischer Physik und Quantenphysik zu betonen, erarbeiteten Küblbeck und Müller [110, S. 25] die Wesenszüge der Quantenphysik. Mit diesen zielen die Autoren neben einer begrifflichen Klarheit insbesondere auf eine Entmystifizierung der Quantenphysik ab. Die vier Wesenszüge der Quantenphysik legen die Autoren folgendermaßen fest (ebd.):

1. *Statistisches Verhalten*: „In der Quantenmechanik sind im Allgemeinen nur statistische Vorhersagen möglich.“
2. *Fähigkeit zur Interferenz*: „Einzelne Quantenobjekte können zu einem Interferenzmuster beitragen, wenn es für das Versuchsergebnis mehr als eine klassisch denkbare Möglichkeit gibt. Keine dieser Möglichkeiten wird dann im klassischen Sinn 'realisiert'.“

3. Eindeutige Messergebnisse: „Auch wenn ein Quantenobjekt in einem Zustand keinen festen Wert der gemessenen Größe hat, findet man immer ein eindeutiges Messergebnis. Die Wiederholung der Messung reproduziert das Ergebnis.“
4. Komplementarität: „Welcher-Weg-Information und Interferenzmuster schließen sich aus. Quantenobjekte können nicht auf Ort und Impuls gleichzeitig präpariert werden.“

Ableitung einer Anforderung an ein neues Curriculum zur Quantenphysik aus fachdidaktischer Perspektive: Ein Unterricht, der die oben vorgestellten Wesenszüge der Quantenphysik zum Ziel hat, ist zum großen Teil in Deckung mit den „Einheitlichen Prüfungsanforderungen in der Abiturprüfung Physik“, in denen die qualitative Vermittlung von Grundaspekten der Quantenphysik formuliert wird:

„Grundlegende Merkmale von Quantenobjekten unter Einbezug erkenntnistheoretischer Aspekte. *Wellenmerkmal, Quantenmerkmal, stochastisches Verhalten, Komplementarität, Nichtlokalität, Verhalten beim Messprozess.*“
[117, S. 5]

Aus fachdidaktischer Sicht stellen die Wesenszüge der Quantenphysik also das Kondensat der Inhalte dar, die Schülerinnen und Schülern vermittelt werden sollen. Als Anforderung an ein neues Curriculum zur Quantenphysik halten wir daher fest:



Eine qualitative Vermittlung der Wesenszüge der Quantenphysik soll dazu führen, dass die Lernenden ihr eigenes Weltbild um das der modernen Physik erweitern können und zwar mittels eines klaren begrifflichen Rahmens.

1.3 Perspektive der Lehrenden

Weber präsentiert in seiner 2018 publizierten Arbeit die Ergebnisse einer umfangreichen Delphi-Studie, bei der Lehrkräfte unter anderem nach ihrem Bedarf für den Quantenphysikunterricht befragt wurden. Die Ergebnisse sprechen eine deutliche Sprache: 94% der befragten Physiklehrkräfte äußern zum Unterricht der Quantenphysik einen Bedarf an Simulationen oder Realexperimenten [214, S. 134f.]. Mehr als drei Viertel der befragten Lehrkräfte (85%) sind an *Einzelphotonenexperimenten* interessiert, mit denen die Wesenszüge der Quantenphysik erfahrbar sind. Ganz besonders auffällig ist, dass von Seiten der Lehrkräfte auf *Praxistauglichkeit* beim zur Verfügung gestellten Material besonderer Wert gelegt wird. Es sollten im besten Fall

- Inhalte in einem Materialverzeichnis strukturiert werden,
- Material in einem Artikulationsschema zeitlich geordnet werden,
- das Material digital zugänglich sein und
- das Material sollte zusätzlich adaptierbar sein.

1.3. PERSPEKTIVE DER LEHRENDEN

Der Wunsch nach praxistauglichen Experimenten für den Quantenphysikunterricht verwundert nicht vor dem Hintergrund, dass meist der Fotoeffekt das einzige gezeigte Experiment zur Quantenphysik ist, welches überdies bekanntlich semiklassisch erklärbar ist [217]. Auch die in Tabelle 1.1 dargestellten Unterrichtskonzepte zur Quantenphysik aus der fachdidaktischen Literatur bieten keine alternativen Realexperimente zur Quantenphysik an. Zwar werden bereits seit einiger Zeit moderne quantenphysikalische Experimente mit einzelnen Photonen didaktisch aufbereitet mit dem Ziele diese in der Lehre zugänglich zu machen [200, 206, 64], allerdings ist das Kriterium *praxistauglich* an Schulen mit diesen Experimenten heute nur schwer erfüllbar. Die hohen Kosten (noch ≥ 10.000 EUR), die mit dem Aufbau eines solchen Experiments zusammenhängen und der Aufwand bei der Justage, verhindern einen praxistauglichen Einsatz [104], obwohl eine Vermittlung der Wesenszüge der Quantenphysik anhand experimenteller Messdaten direkt möglich ist.

Stattdessen machen die verschiedenen Konzepte Gebrauch von vielfältigen Darstellungsformen, welche von abstrakten Symbolen [8, 81, 82, 208, 209], über Animationen oder Visualisierungen [101, 143, 80] bis hin zu interaktiven Bildschirmexperimenten reichen [28].

Ableitung einer Anforderung an ein neues Curriculum zur Quantenphysik aus Sicht der Lehrenden: Lehrkräfte artikulieren einen Bedarf an Experimenten für den Quantenphysikunterricht, wünschen sich im Zweifel Simulationen oder Animationen. Als geeignet sehen die Lehrkräfte Experimente mit einzelnen Quantenobjekten an, beispielsweise Einzelphotonenexperimente. Inhaltlich bekannt und als wichtig erachtet werden aus Sicht der Lehrkräfte die Wesenszüge der Quantenphysik. Dies lässt sich den Ergebnissen einer umfangreichen Delphi-Studie entnehmen [214]. Realexperimente mit einzelnen Quantenobjekten wurden aus unterrichtspraktischer Sicht aber als (noch) nicht unterrichtstauglich erachtet, auch das zeigt eine Befragung von Lehrkräften [104], sodass auf alternative Repräsentationsformen zurückzugreifen ist. Bronner legt in seiner Arbeit die Vorteile von interaktiven Bildschirmexperimenten gegenüber Animationen dar: dabei stellt er insbesondere die Bedeutung der Beobachtung heraus, die in Animationen nicht möglich sei, da diese eine idealisierte Sichtweise auf die Natur darstellten. Stattdessen regten interaktive Bildschirmexperimente außerdem die Eigentätigkeit der Schülerinnen und Schüler an [29, 28, 26, 30] (für Details zu interaktiven Bildschirmexperimenten sei auf Kapitel 2.3 dieser Arbeit verwiesen). Als Anforderung an ein neues Curriculum zur Quantenphysik halten wir daher fest:



Ein neues Konzept soll den Lehrkräften einen praxistauglichen Vorschlag für einen Unterricht zur Quantenphysik machen, der interaktive Bildschirmexperimente einbindet und anhand experimenteller Ergebnisse aus Einzelphotonenexperimenten zu den Wesenszügen der Quantenphysik führt.

1.4 Perspektive der Lernenden

Eine Perspektive, die bei den bisherigen Ausführungen offen geblieben ist, ist die der Lernenden selbst. Welche Bedeutung messen diese dem Quantenphysikunterricht bei? Eine neue, erst 2020 veröffentlichte Studie über die Bedeutung des Lernens über Quantenphysik aus Sicht von Schülerinnen und Schülern an Gymnasien ging dieser Frage nach [142]. Das Kernergebnis der Untersuchung war, dass Lernende die Quantenphysik zwar als wichtig für die Gesellschaft erachteten, nicht notwendigerweise aber auch wichtig für ihr eigenes Leben. Es zeigt sich, dass Schülerinnen und Schüler die Quantenphysik als relevanter erachteten, wenn sie diese für sich persönlich interessant fanden.

Ableitung einer Anforderung an ein neues Curriculum zur Quantenphysik aus Sicht der Lernenden: Die Schlussfolgerung der oben zitierten Autoren ist, dass die beschriebenen Wahrnehmungen der Lernenden sich darin begründen lassen, dass ihnen die gesellschaftliche Relevanz von Quantentechnologien und damit für das Lernen von Quantenphysik häufig nicht bewusst ist. Sie fordern daher auf, Lernenden gegenüber die Verbindungen zwischen Quantentechnologien und -physik sowie ihrem eigenen täglichen Leben deutlicher aufzuzeigen und beziehen sich dabei auch auf andere Arbeiten, etwa von [165], die aus Untersuchungen mit Zehntklässlern ähnliche Schlüsse ziehen. Als Anforderung an ein neues Curriculum zur Quantenphysik halten wir daher fest:



Ein neues Konzept zur Quantenphysik muss inhaltlich motiviert sein durch moderne Aspekte der Quantenphysik, wie sie das gesellschaftliche Leben der Lernenden heute und noch stärker in Zukunft beeinflussen.

1.5 Zusammenfassung: Anforderungen an ein neues Unterrichtskonzept zur Quantenphysik

Mit einem neuen Unterrichtskonzept soll das Ziel verfolgt werden, dass Schülerinnen und Schüler eine moderne Sichtweise auf die Quantenphysik entwickeln, um anschlussfähiges Wissen bis hin zu den Wesenszügen der Quantenphysik aufzubauen. Die aus verschiedenen Perspektiven von der Literatur zur Didaktik der Quantenphysik abgeleiteten Anforderungen an den zukünftigen Quantenphysikunterricht waren die folgenden:

1. Moderne Erkenntnisse zur Quantenphysik sollen Einkehr in den Schulunterricht finden, um Schülerinnen und Schülern einen Einblick in Quantentechnologien zu ermöglichen, die in ihrem Alltag heute und in Zukunft vorkommen.
2. Die Quantenphysik wird, wie in den dargestellten Literaturempfehlungen begründet, nicht als Erweiterung der klassischen Mechanik formuliert. Insbesondere sind mechanistische Sprechweisen und die Diskussion eines Welle-Teilchen-Dualismus im naiven Sinne zu verhindern, um adäquate Vorstellungen zur Eigenschaft „Ort“ in der Quantenphysik zu vermitteln. Eine gewinnbringende Alternative kann in der Vermittlung einer Idee von der Präparation in der Quantenphysik liegen.

1.5. ZUSAMMENFASSUNG: ANFORDERUNGEN AN EIN NEUES UNTERRICHTSKONZEPT ZUR QUANTENPHYSIK

3. Eine qualitative Vermittlung der Wesenszüge der Quantenphysik soll dazu führen, dass die Lernenden ihr eigenes Weltbild um das der modernen Physik erweitern können.
4. Ein neues Konzept soll den Lehrkräften einen praxistauglichen Vorschlag für einen Unterricht zur Quantenphysik machen, der interaktive Bildschirmexperimente einbindet und anhand experimenteller Ergebnisse aus Einzelphotonenexperimenten zu den Wesenszügen der Quantenphysik führt.
5. Ein neues Konzept zur Quantenphysik muss inhaltlich motiviert sein durch moderne Aspekte der Quantenphysik, wie sie das gesellschaftliche Leben der Lernenden heute und noch stärker in Zukunft beeinflussen.

Man sieht, dass die Anforderungen 1 und 5 beieinanderliegen und somit den Kreis schließen. Fasst man die abgeleiteten Forderung der inhaltlichen, der fachdidaktischen sowie der unterrichtspraktischen Sichtweise zusammen, so führt das auf ein benötigtes Unterrichtskonzept, das...

- ...anschlussfähig ist für die Vermittlung von Grundlagen der Quantentechnologien bzw. durch diese Anwendungen motiviert ist, um die Bedeutung der Quantenphysik für die Lernenden begreifbar zu machen.
- ...verbreitete Schülervorstellungen berücksichtigt und daher ein Thematisieren des Welle-Teilchen-Dualismus ausschlägt und mechanistische Sprechweisen verhindert, um bekannte Schülervorstellungen zu umgehen.
- ...von experimentellen Ergebnissen aus (modernen) quantenphysikalischen Experimenten qualitativ zu den Wesenszügen der Quantenphysik führt.
- ...diese Experimente praxistauglich interaktiv darstellt und damit Möglichkeiten zur Eigentätigkeit der Lernenden bietet.
- ...für die Lehrkräfte adaptierbares Arbeitsmaterial zur Verfügung stellt.

Im nächsten Kapitel wird mit dem Erlanger Unterrichtskonzept zur Quantenoptik einen Unterrichtsvorschlag zur Einführung in die Quantenphysik vorgestellt, mit dem der Versuch verbunden ist, diesen Anforderungen gerecht zu werden. Damit kann, wie in in den Arbeiten von Stadermann et al. und Krijtenburg-Lewerissa et al. aus Abschnitt 1.1 gefordert, an einem konkreten didaktischen Vorschlag untersucht werden: inwiefern ist eine Vermittlung moderner Aspekte der Quantenphysik, die über das in Kapitel 1.1.1 vorgestellte internationale Kerncurriculum (vgl. Abbildung 1.1) hinaus gehen, an Gymnasien überhaupt möglich?

KAPITEL 2

Erlanger Unterrichtskonzept zur Quantenoptik

„Was ist Licht? Wellenvorgang oder Teilchenstrahl? Aber allmählich sind wir zu der Einsicht gekommen, daß das Wort 'ist' hier einfach nicht paßt, daß man vielmehr fragen muss, was aus Strahlung werden kann, je nach der Art der Beobachtungs-Auseinandersetzung mit dem Objekt.“

- Pascual Jordan, In: Die Physik und das Geheimnis des organischen Lebens, 1941. S. 29

Einordnung in den Kontext der Arbeit

In diesem Kapitel wird das Erlanger Unterrichtskonzept zur Quantenoptik vorgestellt. Dieses Konzept ist das Ergebnis eines jahrelangen Entwicklungsprozesses. Es ist in enger Kooperation mit der Schulpraxis entstanden und Erfahrungen aus zahlreichen Unterrichtseinsätzen sind in die in dieser Arbeit dargestellten Version eingeflossen. Die im Rahmen des Erlanger Quantenoptikkonzepts bereitgestellten Begriffe und die zugehörige Sachstruktur fußen ganz direkt auf den Ableitungen für Anforderungen an ein neues Curriculum aus Kapitel 1. In diesem Kapitel werden die aus den Ableitungen gefolgerten Designentscheidungen skizziert, um im Anschluss das Konzept ausführlich zu beschreiben. Im anschließenden Kapitel folgt die Darstellung erster entwicklungsbegleitender Evaluationsergebnisse.

2.1 Bezug zu den Anforderungen an ein neues Unterrichtskonzept

Im letzten Kapitel wurde aufgezeigt, dass Physiklehrkräfte in einer Delphi-Studie einen Bedarf an Experimenten im Quantenphysikunterricht zum Ausdruck gebracht haben. In dieser Delphi-Studie von [214] zeigte sich genauso, wie bei einer Fragebogenbefragung von [104], dass die Lehrkräfte das Produkt aus Lernförderlichkeit und Praxistauglichkeit bei Animationen oder Simulationen aber trotzdem höher bewerten, als bei vergleichbaren Realexperimenten. Dies begründet sich vor allem mit den Kosten und dem Aufwand, die mit der Durchführung von Realexperimenten in der Quantenphysik verbunden sind. Als thematisch interessant für Lehrkräfte erwiesen sich in der berichteten Delphi-Studie neben anderen auch Einzelphotonenexperimente. Die unterrichtliche Behandlung von Einzelphotonenexperimenten ist in Übereinstimmung mit

1. der Anforderung, die Quantenphysik nicht als Erweiterung oder Verallgemeinerung der klassischen Mechanik einzuführen, sodass mechanistische Sprechweisen überflüssig werden, welche verbreitete Lernschwierigkeiten fördern (vgl. Kapitel 1.2) und
2. der Anforderung zur Einbindung moderner Quantenphysik an Schulen, wie sie aus den Arbeiten von Stadermann et al. und Krijtenburg-Lewerissa et al. in Kapitel 1.1 gefolgert wurde.

Die Quantenphysik wird auf diese Weise nämlich statt einer Erweiterung der Mechanik als Erweiterung der klassischen Optik formuliert und zwar am Beispiel des Quantenobjekts *Photon* [26, 214]. Die Behandlung der Quantenphysik mit Einzelphotonenexperimenten führt also zu einer Lehre der Quantenphysik, die in der Optik begründet ist [26, 214] - die Quantenoptik.

Das Erlanger Unterrichtskonzept zur Quantenoptik macht einen Vorschlag zu einer an Einzelphotonenexperimenten orientieren Einführung Lernender der gymnasialen Oberstufe in die Quantenphysik. Die Quantenphysik wird - wie oben bereits abgeleitet - als Erweiterung der klassischen Optik formuliert und zwar unter Einbeziehung zeitlicher Bezüge: Der Fokus liegt daher auf Koinzidenz- und Korrelationsexperimenten, mit denen ganz direkt semi-klassisch nicht erklärable Effekte, wie die Antikorrelation, behandelt werden können. Eine besondere Rolle kommt deswegen der Detektion von Quantenlicht zu, die im Konzept explizit behandelt wird. Wir betonen den quantenphysikalischen Messprozess, sowie die technischen Grundlagen der präsentierten Experimente, um mechanistische Sprech- und Denkweisen von vornherein zu verhindern (vgl. Kapitel 1.2).



Die Behandlung technischer Grundlagen der quantenoptischen Realexperimente im Rahmen des Unterrichtskonzepts ermöglicht den Schülerinnen und Schülern etwas über die Arbeitsweisen in der modernen Forschung zur Quantenphysik zu lernen und sie erhalten die Möglichkeit, ihr Weltbild der modernen Physik zu erweitern. Dies ermöglicht eine explizite Thematisierung von verschiedenen Aspekten der Nature of Science [161].

Inhaltlich zielt das Erlanger Unterrichtskonzept zur Quantenoptik auf die Vermittlung der Wesenszüge der Quantenphysik ab, wie in Kapitel 1.2 gefordert. Wir übernehmen dazu weitgehend das von Küblbeck und Müller bereitgestellte begriffliche Rahmenwerk und erweitern es um Begriffe der Quantenoptik, insbesondere im Bezug auf die Präparation von Einzelphotonen (Detektoren, Koinzidenzen) sowie die Interpretation experimenteller Ergebnisse (Antikorrelation am Strahlteiler, Einzelphotoneninterferenz).

Um dem Anspruch gerecht zu werden, das neue Konzept für die Lernenden inhaltlich angemessen zu motivieren, wurde der Kontext Datensicherheit gewählt, der vielen Jugendlichen aus ihrem Umgang mit dem Internet u.ä. bekannt ist.

Ein praxistauglicher Einsatz des Konzepts soll durch drei wesentliche Maßnahmen ermöglicht werden:

1. Anstelle quantenoptischer Realexperimente fungieren interaktive Bildschirmexperimente von [28]. Die visualisierten quantenoptischen Experimente bestehen aus den gleichen Komponenten, wie moderne Forschungslabore.
2. Den Lehrkräften wird umfangreiches Arbeitsmaterial zur Verfügung gestellt, welches sie nach eigenem Bedarf adaptieren können und ein Artikulationsschema, nach dem das Konzept als Ganzes unterrichtet werden kann, wird zur Verfügung gestellt.
3. Das Erlanger Unterrichtskonzept dient einer Einführung in die Quantenphysik in nur vier Schulstunden. Inhaltlich wird damit auf das Wesentliche reduziert, aber Quantenphysik trotzdem auf hohem Niveau anschlussfähig vermittelt.

2.2 Zielgruppe, Inhalte, curriculare Passung und Lernvoraussetzungen

Zielgruppe und Inhalte des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik¹:

Das Erlanger Unterrichtskonzept zur Quantenoptik ist für den Einsatz in der gymnasialen Oberstufe entwickelt worden. Das Konzept kann in vier Unterrichtsstunden² unterrichtet werden. In den beiden ersten Schulstunden werden Grundlagen bzw. technische Aspekte der quantenoptischen Experimente behandelt, sodass darauf aufbauend in den Stunden drei und vier die experimentellen Ergebnisse interpretiert und die daraus implizierten Schlussfolgerungen verstanden werden können.

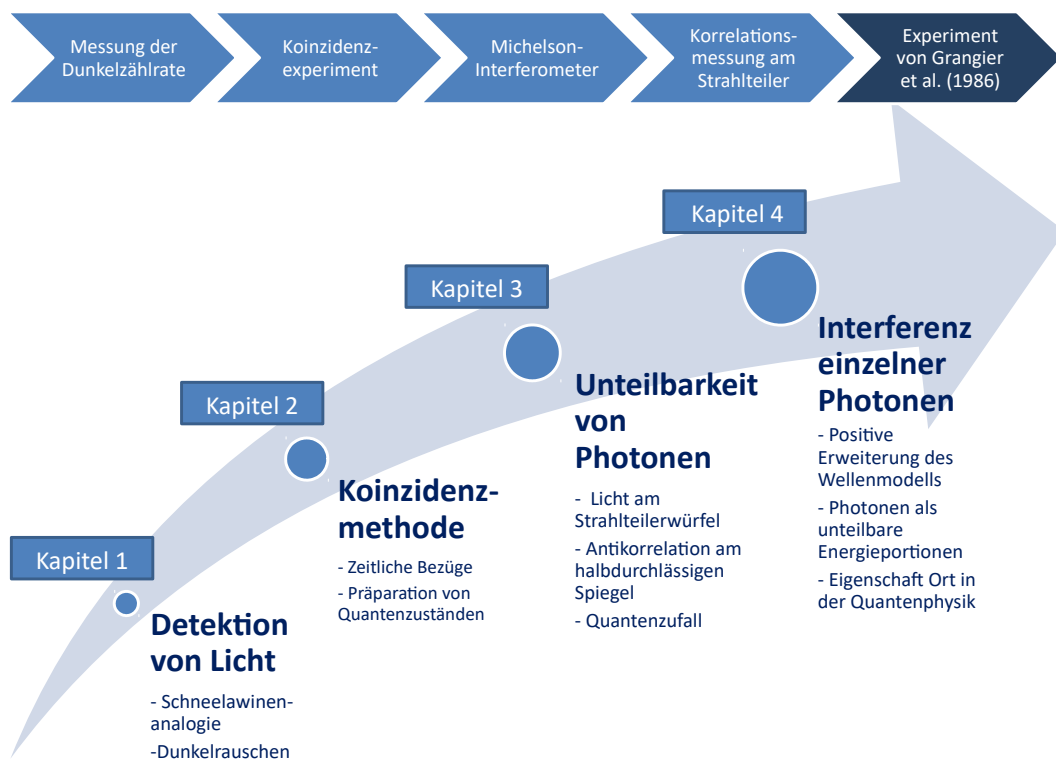


Abbildung 2.1: Die Inhalte des Lehrkonzepts zur Quantenoptik sind angelehnt an die Forschungsarbeit von [69]. In der Kopfzeile ist eine Übersicht über die Experimente gegeben, die im Rahmen des Konzeptes behandelt werden. In den Stunden eins und zwei werden mit der Behandlung der Detektoren bzw. der Koinzidenzmethode technische Grundlagen geklärt. Im Kontext der Behandlung einzelner Photonen am Strahlteilerwürfel werden der Wesenszug *Statistisches Verhalten* und der Quantenzufall behandelt (Stunde 3). Der Wesenszug *Fähigkeit zur Interferenz* von Quantenobjekten wird in Stunde 4 behandelt. Dabei wird insbesondere auch die Eigenschaft „Ort“ und seine Bedeutung in der Quantenphysik diskutiert. Die Abbildung wurde bereits veröffentlicht in [15].

¹Teile des Kapitel 2.2 wurden bereits veröffentlicht bei [15].

²Unter einer Schulstunde verstehen wir hier eine 45 min.-Einheit.

Curriculare Verankerung der Inhalte des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik: Das Erlanger Unterrichtskonzept zur Quantenoptik wurde nicht mit Bezug auf einen speziellen Lehrplan entwickelt. Allerdings hat die Quantenphysik mittlerweile in die gymnasialen Lehrpläne fast aller deutschen Bundesländer Einkehr gefunden. Große Teile der Inhalte aus dem Erlanger Konzept sind schon heute in vielen Bundesländern Deutschlands curricular verankert sind; das entnimmt man beispielsweise der in Kapitel 1 berichteten Arbeit von Staderman et al. [195]. In dieser Arbeit werden die Kernelemente von Quantenphysikcurricula aus sechs deutschen Bundesländern genannt:

2.2. ZIELGRUPPE, INHALTE, CURRICULARE PASSUNG UND LERNVORAUSSETZUNGEN

| | BW | | NS | | NRW | | HS | | SA | | BY |
|---|------|------|------|------|------|------|----|---|----|---|----|
| Jahr der Einführung des Curriculums | 2016 | 2017 | 2014 | 2016 | 2012 | 2011 | | | | | |
| Name des Kurses / Anforderungsniveau | 2 | 4 | G | E | G | L | G | L | G | L | Ph |
| Schwarzkörperstrahlung | | | | | | | | | | | |
| Bohr'sches Atommodell | | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | |
| Diskrete Energieniveaus | | | ■ | ■ | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Licht-Materie-Wechselwirkung | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Welle-Teilchen-Dualismus | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | △ |
| Materiewellen | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | △ |
| Technische Anwendungen | | | ■ | ■ | | | | ■ | ■ | | ■ |
| Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation | | ■ | ■ | ■ | | ■ | □ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Wahrscheinlichkeitsaussagen | ■ | ■ | ■ | ■ | | ■ | ■ | ■ | | ■ | △ |
| Philosophische Interpretationen | | | | ■ | | ■ | □ | ■ | | ■ | |
| Potentialtopfmodell | | | ■ | ■ | | ■ | | ■ | | ■ | ■ |
| Tunneleffekt | | | | | | | | □ | | | ■ |
| Orbitalmodell | | | | ■ | | | □ | | | ■ | ■ |
| Periodensystem | | | | | | | | ■ | | | ■ |
| Verschränkung | | | | ■ | | | | | | ■ | |
| Schrödingergleichung | | | | | | | | □ | | | ■ |
| Berechnungen von Detektionswahrscheinlichkeiten | | | | ■ | | ■ | | ■ | | | |

Tabelle 2.1: Quantenphysik-Themen in den Lehrplänen Baden-Württembergs (BW), Niedersachsens (NS), Nordrhein-Westfalens (NRW), Hessens (HS), Sachsens (SA) und Bayerns (BY) nach [195]. Behandlung in Jahrgangstufe 10 (△), in der Oberstufe (■) bzw. im optionalen Bereich (□). Die in blau geschriebenen Themen sind direkt oder indirekt Inhalte des Erlanger Unterrichtskonzepts.

Lernvoraussetzungen: Zwar unterscheidet sich die inhaltliche und zeitliche Einordnung der Quantenphysik innerhalb der jeweiligen Curricula, allerdings sind die Lernvoraussetzungen beim hier vorgestellten Konzept gering: Die Schülerinnen und Schüler...

- ...kennen die grundlegenden Begriffe der Wellenlehre, also insbesondere die Wellenlänge λ , die Frequenz ν und den Zusammenhang $c = \lambda \cdot \nu$.
- ...kennen Interferenz als ein Wellenphänomen.
- ...wissen, dass die Energie von Licht proportional zu seiner Frequenz ν ist: $E \propto \nu$.
- ...beschreiben physikalische Vorgänge mit Hilfe der Energie- und der Impulserhaltung.

Die Reduktion der Inhalte auf ein in vier Unterrichtsstunden durchführbares Konzept bildet einen Konsens aus den im vorherigen Abschnitt dargestellten Anforderungen, den curricularen Vorgaben, sowie den zeitlichen Kapazitäten im Unterricht.



Durch das Erlanger Unterrichtskonzept zur Quantenoptik sollen die Lernenden ein verbessertes Konzeptverständnis für die Quantenphysik erwerben durch:

- Direktes Ansetzen an nicht semiklassisch erklärbaren Effekten anhand von Ergebnissen aus quantenoptischen Realexperimenten.
- Erweiterung des begrifflichen Rahmens der Wesenszüge der Quantenphysik um auf Experimente bezogene technische Aspekte moderner quantenphysikalischer Forschung aus der Quantenoptik.
- Vermittlung von Aspekten von Nature of Science im Kontext realer Laborsituationen (Interpretation von Messergebnissen etc.).
- Fächerverbindende Anknüpfungspunkte, insbesondere zur Informatik (Datensicherheit und Quantencomputer).

2.3 Das IBE als Repräsentationsform



In der in Kapitel 1 berichteten Studie [214] zeigte sich, dass Lehrkräfte sich Animationen oder Simulationen für den Quantenphysikunterricht wünschten und zwar eingebettet in Arbeitsmaterial (vgl. Kapitel 1). Auf diesen Bedarf soll mit dem Erlanger Unterrichtskonzept zur Quantenoptik eingegangen werden. Wir wollen in diesem Abschnitt verschiedene darstellende Repräsentationsformen gegenüberstellen, um herauszuarbeiten, weshalb die Wahl für unser Konzept auf interaktive Bildschirmexperimente gefallen ist.

Unter Repräsentationen versteht man in der Physikdidaktik Formate zum Aufzeichnen, Speichern und Präsentieren von Informationen und eine Reihe von Operatoren, die die darzustellenden Informationen modifizieren [202, S. 28]. Repräsentationen sind also ganz einfach gesprochen, alle Objekte oder Ereignisse, die etwas darstellen sollen [181, S. 102]. Ein Modell zur Klassifikation solcher Repräsentationen haben Schnotz und Bannert vorgestellt: sie unterscheiden nicht Text- und Bilddarstellung alleine, sondern solche Repräsentationen die *beschreibenden* (*descriptive*) und solche, die *abbildenden* (*depictive*) Charakter besitzen [182, 1]. Externe Repräsentationen können Lernende bei komplexen Lernprozessen unterstützen [1]. Insbesondere ermöglichen sie Lernenden auch „visuelle Assoziationen, die sie einfangen können, und bewahren das Wesen physikalischer Phänomene effektiver als verbale Beschreibungen“ [38].

Die Repräsentation physikalischer Experimente in Medien ist seit langem Teil der physikdidaktischen Forschung, siehe z.B. [97, 96, 23] - insbesondere im Kontext von Experimenten, die aus praktischen oder finanziellen Gründen in Schulen nicht realisierbar sind. Diese Repräsentationen fallen gemäß dem Modell von Schnotz und Bannert überwiegend in den abbildenden Zweig. Sie unterscheiden sich allerdings deutlich nach der Art des Einsatzes oder dem Grad der Aktivierung der Lernenden zur Eigentätigkeit [97]. Im Folgenden soll auf einige der gängigen modalen Repräsentationsformen physikalischer Experimente in Medien eingegangen werden, um abzuleiten, welche Repräsentationsform quantenoptischer Experimente für das Unterrichtskonzept am geeignetsten erscheint:

Interaktive Bewegbild-Medien: Realexperimente können im Physikunterricht in Form gefilmter Demonstrationsexperimente gezeigt werden [97]. Dabei ist keine Eigentätigkeit der Lernenden vorgesehen und der Informationsfluss wird nur bei der Produktion, nicht aber durch die Nutzenden, beeinflusst [97]. Dies geht mit einem eher transmissiven Bild von Physiklernen einher: gerade vor dem Hintergrund eines konstruktivistischen Lernverständnisses ist die fehlende Möglichkeit zur Selbststeuerung durch die Lernenden ein Nachteil [96]. Zollman et al. kritisieren insbesondere, dass die direkte und an die Bedürfnisse der Lernenden angepasste Reaktion von Lehrkräften durch diese Medien nicht ermöglicht wird [228, 97]. Interaktive Videos ermöglichen Lernenden immerhin einfache eigene Tätigkeiten [97].

Remotely Controlled Labs: Remotely Controlled Labs ermöglichen zwar den Zugang zu einem fernsteuerbarem Experiment über das Internet [96], können aber jeweils nur

an einem PC gleichzeitig genutzt werden, sodass ein Einsatz zu unterrichtlichen Zwecken nur eingeschränkt möglich scheint [97]; dafür erzeugen die Originaldaten aus einer authentischen Laborumgebung einen „Live-Effekt“ und damit eine erhöhte Akzeptanz der Lernenden [97]. Bronner gibt zu bedenken, dass für die Einrichtung eines Remotley Controlled Labs insbesondere infrastrukturelle Ressourcen notwendig sind [28, 26].

Simulationen: Simulationen ermöglichen Nutzenden die Manipulation gewisser experimenteller Parameter. Dies führt auf einen hohen Freiheitsgrad beim Lernen mit Simulationen [97, 96]. Im Allgemeinen eignen sich Simulationen vor allem beim Veranschaulichen abstrakter Modelle bzw. beim Vermitteln ablaufender Mechanismen bei Phänomenen [96, 188, S. 8]. Die Ableitung von naturwissenschaftlichem Wissen aus der experimentellen Beobachtung kann mit Hilfe von Simulationen aber nicht vermittelt werden. Stattdessen stellen Simulationen oft eine Natur dar, die sich exakt nach der entsprechenden Theorie richtet [28].

Interaktive Bildschirmexperimente: Interaktive Bildschirmexperimente (IBEs) stellen reale Experimente mit Hilfe von Fotos aus verschiedenen Perspektiven und zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Experimentdurchführung dar und werden durch Video-, Audio- oder experimentelle Daten aus dem Labor ergänzt [97]. Dies grenzt sie von Simulationen klar ab. Eine interaktive Benutzeroberfläche ermöglicht den Lernenden eine realitätsnahe Manipulation des Experiments nach dem Prinzip der „direkten Manipulation“ [96]. Der Einsatz von IBEs im Unterricht kann zu einem lernförderlichen Unterricht beitragen. Vor allem dann, wenn nicht experimentelle Fähigkeiten, sondern Fachwissen erworben werden soll, lernen Schülerinnen und Schüler mit IBEs genauso gut oder sogar schneller, als mit den entsprechenden Realexperimenten [23, 97]. Eingesetzt werden IBEs insbesondere dann, wenn die Realexperimente im Unterricht nicht umsetzbar sind, z.B. aus Kostengründen. In diesem Zusammenhang sind auch die IBEs zu quantenoptischen Realexperimenten von Bronner entstanden [29, 28, 26].

Das IBE erscheint letztlich als geeignete Repräsentationsform quantenoptischer Realexperimente für einen randbedingungsfreien und praxistauglichen Einsatz im Unterricht: Die Durchführung von quantenoptischen Realexperimenten ist nach wie vor eine teure und aufwendige Angelegenheit. Ein praxistauglicher Einsatz für unterrichtliche Zwecke ist noch nicht möglich. Interaktive Bildschirmexperimente bieten eine praxistaugliche Alternative zum Realexperiment und Vorteile gegenüber anderen möglichen Repräsentationsformen, wie etwa die Folgenden:

- Variabler Einsatz im Unterricht ohne Hürden
- Realitätsgetreues Abbild einer quantenoptischen Laborsituation
- Originalmessdaten anstatt einer Steuerung durch mathematischen Algorithmus
- Möglichkeit einer Eigentätigkeit der Lernenden statt bloßer Rezeption

Aus den aufgeführten Gründen haben wir uns zur Verwendung von IBEs im Rahmen des Erlanger Unterrichtskonzeptes entschieden.

2.4 Begriffe und Konzepte

Im Erlanger Unterrichtskonzept zur Quantenoptik wird das begriffliche Rahmenwerk zu den Wesenszügen der Quantenphysik von [110] aufgenommen und erweitert: Um Wissen und Vorstellungen zur Quantenphysik auf hohem Niveau und anschlussfähig zu vermitteln, sollen zusätzlich fachwissenschaftlich anerkannte Begriffe im Sinne ihrer modernen Deutung verstanden und verwendet werden. Dazu ist eine Behandlung technischer Grundlagen der quantenoptischen Experimente unabdingbar. In diesem Kapitel sollen zunächst die zentralen Begriffe und Ideen des Erlanger Konzepts präsentiert werden. Außerdem wollen wir die zentralen Experimente präsentieren und darstellen, welche fachlichen Erkenntnisse aus ihnen für den Quantenphysikunterricht gewonnen werden können. Die Frage nach der konkreten unterrichtlichen Behandlung der einzelnen Aspekte im Rahmen des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik wird in einem der folgenden Abschnitte ausführlich geklärt (vgl. Abschnitt 2.6). Teile dieses Kapitels 2.4 sind bereits erschienen in [14].

Quantenphysikalischer Messprozess und Detektoren in Einzelphotonenexperimenten³ Begriffe der klassischen Physik können nicht ohne Weiteres in die Quantenphysik übertragen werden - man denke dazu etwa an den Ort: während die Dynamik in der klassischen Physik die Festlegung einer Trajektorie eines Körpers aus einer Bewegungsgleichung ermöglicht, besitzen Quantenobjekte, wie Elektronen oder Photonen die Eigenschaft Ort nicht permanent: „Vom Ort eines Quantenobjekts kann nur im Kontext einer Messung gesprochen werden. Der Begriff des Messens nimmt daher eine zentrale Stellung in der Quantenphysik ein“ [49]. Den quantenphysikalischen Messprozess in einem adäquaten Kontext zu lehren, erfordert ein Verständnis Lernender für die zugehörigen experimentellen Komponenten. Im Erlanger Unterrichtskonzept werden zum Beispiel Experimente mit Binärdetektoren durchgeführt.

Solche Binärdetektoren senden bei Beleuchtung mit schwachem Licht kurze elektrische Impulse aus. Ein häufig von uns angetroffenes Präkonzept ist es zu denken, ein Puls bzw. "Klick" eines Detektors stünde für die Absorption eines einzelnen Photons. Dass dies nicht stimmen kann, sieht man unter anderem daran, dass Photomultipliertubes (PMT) oder Avalanche-Photodioden (APD) bei zunehmender Temperatur häufiger klicken und dies hat offensichtlich nichts mit einzelnen Photonen zu tun [14]. In den Experimenten, die im Rahmen des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik eingesetzt werden, kommen APDs zum Einsatz.

³Dieser Abschnitt ist in Teilen bereits veröffentlicht bei [49].



Eine Lawinenphotodiode, engl. **Avalanche Photo Diode** (kurz APD) besitzt typischerweise ein $p^+ - i - p - n^+$ -Dotierprofil und macht ihrem Namen alle Ehre: wie bei einer *pin*-Diode dient die schwach *p*-dotierte intrinsische *i*-Schicht als Absorptionsgebiet. Wird durch Lichteinfall ein Elektron-Loch-Paar erzeugt, so wird das Elektron vom Absorptionsgebiet in Richtung der *p*-Schicht beschleunigt. Im $p - n^+$ -Übergang werden die Elektronen aufgrund hoher elektrischer Feldstärken stark beschleunigt und erzeugen durch Stoßionisation weitere Elektron-Loch-Paare. Die Sekundärladungsträger werden wiederum beschleunigt, was zu einer Verstärkung führt. Details zur Funktionsweise von APDs liest man zum Beispiel bei [130, 45] nach.

Genau wie PMTs besitzen APDs bei Abwesenheit von jeglicher Beleuchtung eine gewisse Zählrate, die als Dunkelzählrate bezeichnet wird. Diese wird im Erlanger Unterrichtskonzept explizit behandelt und ausführlich diskutiert.



Man unterscheidet **primäre** und **sekundäre Dunkelzählereignisse**. Primäre Dunkelzählereignisse sind auf thermisch erzeugte Ladungsträger in der Sperrschicht zurückzuführen und diese kann durch Kühlung minimiert werden, denn die Dunkelzählrate hängt exponentiell von der Temperatur ab [45]. Sekundäre Dunkelzählereignisse schreibt man anderen Effekten, wie z.B. dem Afterpulsing, zu [65].

Parametrische Abwärtskonversion in nichtlinearen Kristallen⁴ Die Erzeugung von Quantenlicht geschieht in den im Erlanger Unterrichtskonzept vorgestellten Experimenten mittels parametrischer Abwärtskonversion in einem nichtlinearen Kristall. Die parametrische Abwärtskonversion ist ein quantenelektrodynamischer Prozess, der einer Reaktion eines nichtlinearen Kristalls auf einfallendes intensives Licht entspricht [63, S. 300]. „Die parametrische Fluoreszenz, englisch parametric downconversion (PDC), kommt vor in optisch nichtlinearen Medien. Spezielle Kristalle wie Beta-Bariumborat (BBO) haben kein Inversionszentrum und bei der Einstrahlung intensiven Lichts werden aufgrund unsymmetrischer nichtlinearer Polarisierung elektromagnetische Felder mit neuen Frequenzen erzeugt [85]. Grüne Laserpointer enthalten beispielsweise optisch nichtlineare Kristalle zur Frequenzverdopplung eines Infrarotlasers. Die parametrische Fluoreszenz ist nicht mit klassischen elektromagnetischen Feldern erklärbar, sondern erfordert die Quantenfluktuation des Vakuums. Diesbezüglich ist sie eng verwandt mit der spontanen Emission von Atomen. Die Lösung der Schrödinger-Gleichung liefert stationäre Zustände, also stabil angeregte Atome. Erst die Quantenelektrodynamik gibt eine quantitative Erklärung der spontanen Emission“ [10]. Eine häufige Erklärung basiert auf einem einfallenden Photon, aus dem durch die Abwärtskonversion zwei Photonen doppelter Wellenlänge werden: ein einfallendes Photon mit der Wellenlänge $\lambda = 405\text{nm}$ wird umgewandelt in zwei Photonen bei $\lambda = 810\text{nm}$. Die Energie und Impulserhaltung wird durch Phasenanpassung erfüllt und führt dazu, dass das erzeugte Photonenpaar auf einem Emissionskegel mit einem Öffnungswinkel von 3° emittiert wird.

⁴Dieser Abschnitt ist bereits veröffentlicht bei [10].



Es sei an dieser Stelle ein didaktischer Vorgriff gestattet: Die hier präsentierte Sichtweise auf die parametrische Fluoreszenz (einfallendes Photon führt zu Emission von Photonenpaar doppelter Wellenlänge) mag aus fachwissenschaftlicher Perspektive in Ordnung und üblich sein [44]. Fachwissenschaftler können so über diesen Prozess reden und kommen dennoch zu richtigen experimentellen Ergebnissen. Für das konzeptionelle Verständnis Lernender kann diese Sichtweise aber lernhinderlich sein, impliziert sie doch in gewisser Weise ein Sender-Empfänger-Denken und viel schlimmer, die Vorstellung von Licht bestehend aus einzelnen Teilchen im naiven Sinn. In diesem Konzept soll der PDC-Prozess daher auf die Behandlung von Energie- und Impulserhaltung im Modell atomarer Energieübergänge reduziert bleiben.

Präparation von Einzelphotonenzuständen Die Theorie des PDC-Prozesses verspricht zeitgleich emittierte Photonenpaare und zwar symmetrisch unter einem Winkel von je 3° zur optischen Achse. Stellt man unter diesem Winkel auf beiden Seiten der optischen Achse jeweils einen Detektor mit Blickrichtung auf den nichtlinearen Kristall auf, so erwartet man gemäß der PDC-Theorie gleichzeitige Klicks in beiden Detektoren. Solche gleichzeitigen Ereignisse bezeichnet man als Koinzidenzen. Die koinzidenten Ereignisse sprechen für die Detektion eines Photonenpaars aus dem PDC-Prozess im Kristall, abgesehen von zufälligen Koinzidenzen. Diese Messmethode nennt man Koinzidenzmethode und sie ist eine fundamentale Messmethode, nicht nur in der Quantenoptik [152].

Mit Hilfe koinzidenter Ereignisse können also Einzelphotonen präpariert werden, denn das Photon im einen Arm des Experiments dient als Trigger für das im anderen Arm. Es wird schnell ersichtlich, dass man ohne die koinzidenten Ereignisse nicht von Einzelphotonen sprechen könnte, etwa weil die Detektoren einem statistischen Rauschen unterliegen und daher nicht von einem Klick auf ein Photon geschlossen werden kann. Weber schreibt daher, man würde einzelne Photonen mit Hilfe der Koinzidenzmessung aus dem Dunkelrauschen diskriminieren [214]. Man sagt auch: das Photon am einen Detektor, genannt Triggerdetektor, kündigt ein Photon beim anderen an, weshalb nichtlineare Kristalle wie der BBO mitunter als Quelle angekündigter Photonen bezeichnet werden [25].

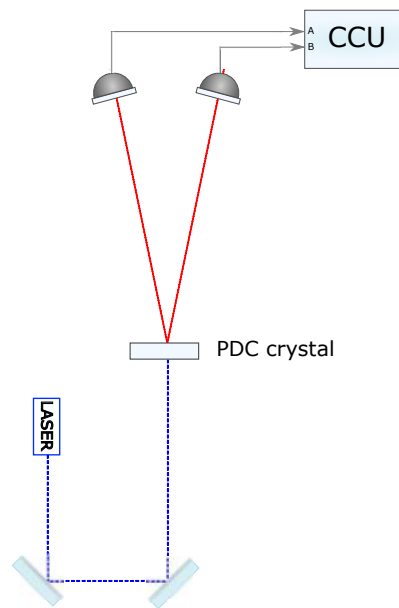


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung des Koinzidenzexperimentes. Das vom Kristall emittierte Licht hat doppelte Wellenlänge ($\lambda = 810\text{nm}$), wie das des einfallenden Lasers ($\lambda = 405\text{nm}$). Die Impulserhaltung kann durch Phasenanpassung erfüllt werden und erklärt die Emission des Fluoreszenzlichts unter einem Winkel von 3° zur optischen Achse. Für Details siehe [26]. Die Detektoren werden wie üblich mit *A* (für Alice) und *B* (für Bob) bezeichnet. Ein Klick beim einen Detektor (genannt Bob) ist notwendige Voraussetzung für ein Photon beim zweiten Detektor (genannt Alice). Die Rollen von Alice und Bob sind vertauschbar. Die Abbildung wurde bereits veröffentlicht in [14].



Streng genommen muss der Begriff der Gleichzeitigkeit hier etwas gelockert werden, denn elektronisch bedingt, ist mit Gleichzeitigkeit hier „innerhalb eines Koinzidenzzeitfensters τ “ gemeint [214]. Dies soll aber im Unterricht nicht weiter thematisiert werden, außer Schülerinnen oder Schüler fragen explizit nach. Details dazu finden sich auch im Kapitel 2.5, in dem die fachlichen Grenzen des Konzepts benannt werden.

Das theoriegeleitete Experiment im Erlanger Unterrichtskonzept zur Quantenoptik Ein ganz zentraler Unterschied zwischen der klassischen Physik und der Quantenphysik ist die Rolle der Beobachtung: Während in der klassischen Physik (man denke beispielsweise an die Astronomie) die Beobachtung gängiges Mittel naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung ist, ist diese in der Quantenphysik in der Form nicht möglich [10]. Dies hängt eng damit zusammen, dass Quanteneffekte nicht direkt aus den Ergebnissen eines Experiments abgeleitet werden, sondern umgekehrt die Theorie zu einem Experiment führt, dessen Ergebnisse wiederum im Einklang zur ursprünglich vorausgesetzten Theorie sein sollen. Wir sprechen dabei von theoriegeleiteten Experimenten. Im Folgenden werden die Experimente und die damit zusammenhängenden Messungen daher fachlich geklärt.

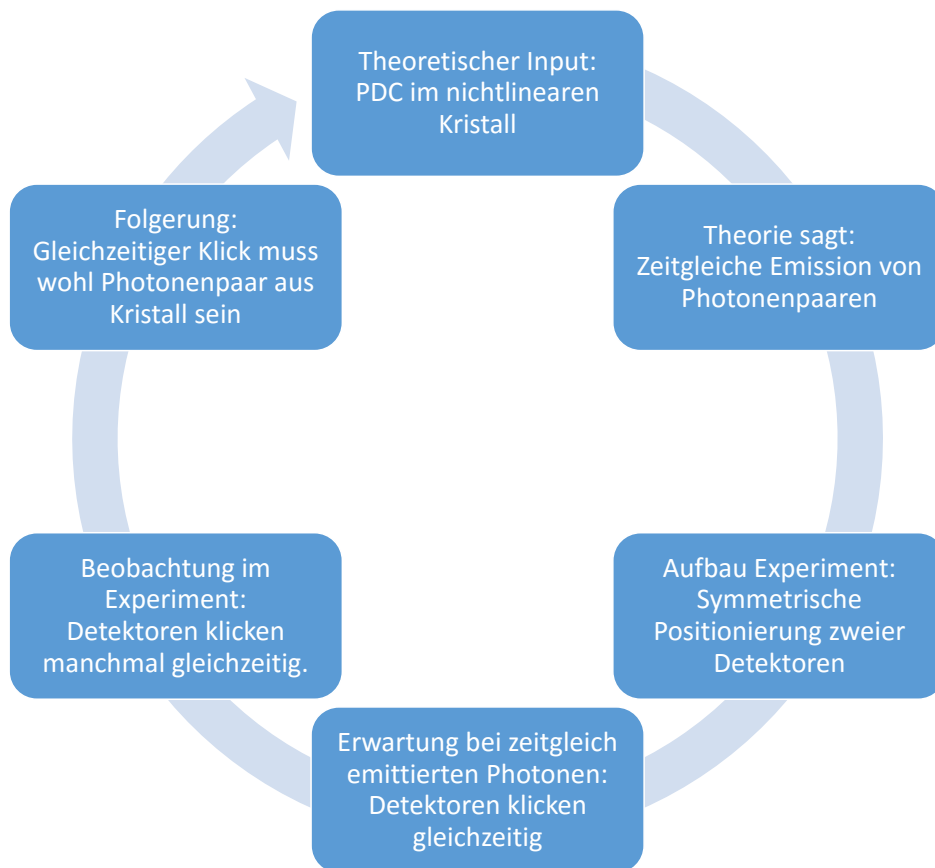


Abbildung 2.3: Im Erlanger Unterrichtskonzept spielen theoriegeleitete Experimente eine wichtige Rolle. Dabei steht stets die Frage im Zentrum, welche Annahmen bzw. Theorie in den experimentellen Aufbau eingehen und welche Erwartungen an die Ergebnisse damit zusammenhängen. Hier dargestellt für das Beispiel der Präparation von Quantenzuständen.

Die Art der Messung und das verwendete Messgerät spielen folglich für die Ergebnisse eines Experiments eine umso größere Rolle. Daher soll in diesem Konzept der Detektor eine zentrale Rolle einnehmen. Die Abhängigkeit der Ergebnisse von der technischen Konstruktion der Detektoren muss bewusst sein.



Die Detektoren sollen aus den im Vorfeld angeführten Gründen *nicht* eingeführt werden als Objekte, die die Photonen registrieren, welche von einer Quelle (Photonenquelle) ausgesandt wurden: um mechanistische Sprechweisen und eine Sender-Empfänger-Vorstellung zu umgehen, muss stattdessen die Art der Beobachtung betont werden, nämlich mit dem Fokus auf den zeitlichen Bezügen zwischen zwei Detektoren.

Antikorrelation am halbdurchlässigen Spiegel⁵ Der erste in einem Labor gemessene Quanteneffekt war Antibunching [95]. Zum Nachweis von Antibunching im didaktischen Rahmen, werden hauptsächlich Korrelationsmessungen an den beiden Ausgängen eines halbdurchlässigen Spiegels durchgeführt, etwa bei [206, 184, 64, 158]. Antibunching kann bei Quantenlicht beobachtet werden, welches an den Ausgängen eines halbdurchlässigen Spiegels antikorreliert ist. In Experimenten mit angekündigten Photonen nutzt man einen Aufbau mit drei Detektoren:

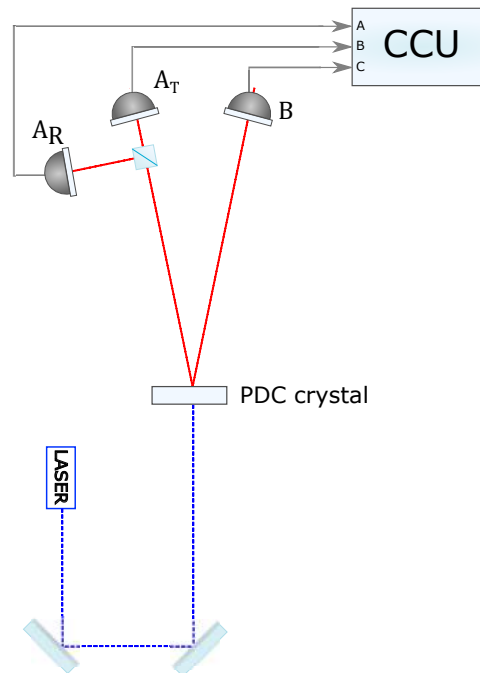


Abbildung 2.4: Schematischer Aufbau zur Untersuchung des Verhaltens von Einzelphotonen am Strahlteilerwürfel. Dabei ist die Zahl der Triplekoinzidenzen zwischen den Detektoren am reflektierenden Ausgang (A_R), am transmittierenden Ausgang (A_T) und dem Triggerdetektor (B) entscheidend. Die Abbildung wurde bereits veröffentlicht in [14].

Stellt man sich einen Laser vor, der auf den Strahlteilerwürfel trifft, so wären Koinzidenzen zwischen den Detektoren A_R und A_T die Regel (Korrelation). Eine Antikorrelation zwischen den Detektionen an den beiden Ausgängen des Strahlteilerwürfels hingegen steht im Widerspruch zu einem klassischen Wellenmodell des Lichts. Grangier et al. schreiben in ihrem bekannten Artikel „*Experimental Evidence for a Photon Anticorrelation Effect on a Beam Splitter: A New Light on Single Photon Interferences*“ von 1986 dazu: „A single-photon can only be detected once“ [69, S. 173]. In diesem Papier führen die Autoren den Antikorrelationsfaktor α ein: α setzt die Wahrscheinlichkeit für eine Koinzidenz zwischen den Detektoren an den beiden Ausgängen des Strahlteilers in Beziehung mit der Wahrscheinlichkeit für zufällige Koinzidenzen. Im klassischen Fall (Korrelation, man denke an den Laser) sind Koinzidenzen zwischen den Ausgängen des Strahlteilers natürlich die Regel und man erwartet daher $\alpha \geq 1$. Im Fall von $\alpha < 1$ beobachtet man umgekehrt weniger Koinzidenzen zwischen den Ausgängen des Strahlteilers,

⁵Dieser Abschnitt wurde bereits im Rahmen einer Veröffentlichung publiziert: [14].

2.4. BEGRIFFE UND KONZEPTE

als man zufällige Koinzidenzen erwarten würde - Quantenlicht. α erlaubt demnach eine quantitative Beurteilung der Reinheit von Einzelphotonenzuständen [123] und ermöglicht eine quantitative Grenze zwischen klassischer und Quantenwelt. Der Antikorrelationsfaktor α berechnet sich im oben dargestellten Aufbau aus den Koinzidenzraten zu

$$\alpha := \frac{N_{A_R A_T B} \cdot N_B}{N_{A_R B} \cdot N_{A_T B}},$$

wobei N_X die Zählrate des Detektors X meint, N_{XY} für die Koinzidenzrate zwischen den Kanälen X und Y steht und N_{XYZ} die Rate von Triplekoinzidenzen zwischen X , Y und Z meint. Im Kontext der Theorie optischer Korrelationen wird α üblicherweise als $g^2(0)$ bezeichnet.



Beispiel: Im oben dargestellten Experiment messe man $\alpha = 0.040 \pm 0.003$. Das bedeutet, Triplekoinzidenzen werden seltener beobachtet als im klassischen Fall erwartet: man hat nur $\frac{1}{25}$ der Triplekoinzidenzen gemessen, die durch zufällige Koinzidenzen erwartet würden [10].

Tiefere Informationen zum Antikorrelationsfaktor $g^2(0)$ findet man in Lehrbüchern zur Quantenoptik, etwa [63].

Am Beispiel des Antikorrelationsexperiments wird außerdem das statistische Verhalten von Quantenobjekten diskutiert - wie, wird in Kapitel 2.6 dargestellt.

Einzelphotoneninterferenz und Photonen⁶ Das Paper von [69] leitet inhaltlich weitere Schritte an: so erweiterten Grangier et al. das Experiment aus Abbildung 2.4 um ein Mach-Zehnder-Interferometer, um Einzelphotoneninterferenz zu zeigen. Alternativ kann, wie bei [26], bei der Umsetzung auf ein Michelson-Interferometer zurück gegriffen werden, aber dadurch ändert sich das Experiment konzeptuell nicht. Der schematische Aufbau ist der Folgende:

⁶Dieser Abschnitt wurde bereits im Rahmen einer Veröffentlichung publiziert: [14].

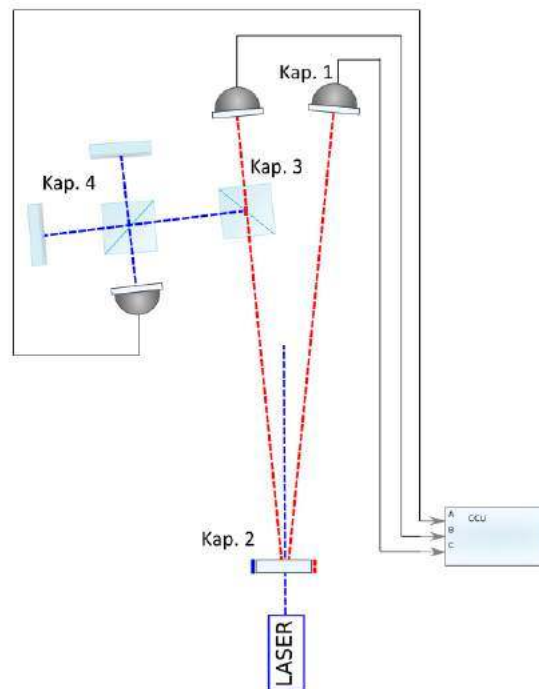


Abbildung 2.5: Schematischer Aufbau zur Erweiterung des Antikorrelationsexperiments um ein Michelson-Interferometer, mit dem zusätzlich Einzelphotoneninterferenz gezeigt werden kann. Die einzelnen Bestandteile des Experiments werden auch in den einzelnen Kapiteln des Unterrichtskonzepts unterrichtlich behandelt. Die Schülerinnen und Schüler sind somit letztlich prinzipiell dazu in der Lage das Paper [69] zu lesen. Diese Abbildung wurde bereits publiziert in [10, 11, 13] und ist angelehnt an [214].

Grangier et al. beschrieben die beiden Experimente zusammenfassend in ihrer Arbeit so:

„Two triggered experiments have thus been performed, using the same source and the same triggering scheme for the detectors. They illustrate the wave-particle duality of light.“ [69, S. 178]

Und führen weiter aus:

„Indeed, if we want to use classical concepts, or pictures, to interpret these experiments, we must use a particle picture for the first one ('the photons are not split on a beam splitter'), since we violate an inequality holding for any classical wave model. On the contrary, we are compelled to use a wave picture ('the electromagnetic field is coherently split on a beam splitter') to interpret the second (interference) experiment.“ [69, S. 178f]



Grangier et al. berichten in ihrem Paper übrigens einen gemessenen Antikorrelationsfaktor $\alpha = 0.18 \pm 0.06$ und erreichten im Interferenzexperiment eine Sichtbarkeit von $V = (98.7 \pm 0.5)\%$.

2.4. BEGRIFFE UND KONZEPTE

Inhaltlich und sprachlich nutzen wir das Einzelphotonenexperiment im einführenden Quantenphysikunterricht für vier zentrale Folgerungen:

1. Photonen verhalten sich grundsätzlich wie klassisches Licht (Interferenz im Michelson-Interferometer), d.h. das Wellenmodell bleibt gültig. Die Quantenphysik steht nicht im Widerspruch zur klassischen Optik, sondern...
2. ...sie ist als Erweiterung zu verstehen: Unter Hinzunahme zeitlicher Bezüge zwischen Binärdetektoren wird klar, dass die Vorstellung des Photons als lokalisierbares Teilchen ungültig sein muss, denn sonst würde man keine Interferenz feststellen. Damit lernen wir etwas über Eigenschaften von Quantenobjekten, nämlich:
3. Man kann Quantenobjekten klassisch wohldefinierte Eigenschaften, wie den Ort nicht permanent zuordnen. Wir bezeichnen sie daher als *nicht permanent lokalisierbar*.
4. Die Koinzidenzmessung entspricht einer Ortsmessung, d.h. man präpariert so den Ort von Photonen.

Die obige Abbildung 2.5 zeigt bereits, dass die einzelnen Komponenten des Experiments aus der Forschungsarbeit von Grangier et al. Schritt für Schritt im Erlanger Konzept behandelt werden, d.h. die zitierte Forschungsarbeit liegt dem Konzept maßgeblich zugrunde. Dies geht nur, wenn gewisse technische und konzeptuelle Aspekte im Sinne einer didaktischen Reduktion bei der Vermittlung gar nicht, oder nur untergeordnet, behandelt werden. Diese fachlichen Grenzen unseres Konzepts werden im nächsten Abschnitt kurz benannt, um im Anschluss die Sachstruktur des Konzepts detailliert vorzustellen.



Wie berücksichtigt die in diesem Kapitel vorgestellte Begriffswahl für das Erlanger Konzept nun die Vorstellungen der Lernenden?

- Betonung des Präparationsbegriffs, statt der Zuweisung von permanenten Eigenschaften bei Quantenobjekten am Beispiel der Eigenschaft „Ort“.
- Betonung der Beobachtersicht - also des Detektors -, um eine Sender-Empfängervorstellung (vgl. „Photonenquellen und Schirm“) und damit mechanistische Sprech- und Denkweisen zu umgehen.
- Erweiterung des Wellenmodells des Lichts anstelle der Gegenüberstellung zweier - scheinbar - widersprüchlicher Modelle (vgl. Welle-Teilchen-Dualismus).

2.5 Fachliche Grenzen und Anschlussfähigkeit des Konzepts

Im Rahmen des Erlanger Unterrichtskonzepts werden quantenoptische Konzepte in didaktisch rekonstruierter Form vermittelt. Es ist klar, dass dabei gewisse technische oder theoretische Details im Bezug auf quantenoptische Experimente im Zuge des Unterrichtsgangs nicht problematisiert werden: Die Grenzen, die das Erlanger Unterrichtskonzept inhaltlich mit sich bringt, können unterteilt werden in technische Aspekte und in Aspekte des mathematischen Formalismus. Auf einige dieser Grenzen des Konzepts soll im Folgenden eingegangen werden.

2.5.1 Mathematisch-formale Grenzen des Konzepts

In einem lesenswerten Artikel behandeln Scholz et al. (2020) die dem Erlanger Unterrichtskonzept zur Quantenoptik zugrunde liegenden Experimente zusammen genommen als Schlüsselexperiment beim Übergang von klassischer Physik zur Quantenphysik [185]. Die Autoren stellen die beiden Experimente zu Einzelphotonen am Strahlteilerwürfel und zum Einzelphoton im Michelson-Interferometer vor. Die Antikorrelation am Strahlteilerwürfel wird, wie im hier vorgestellten Konzept, mit Hilfe des Antikorrelationsfaktors behandelt.

Die Interferenz einzelner Photonen ist die Folge der Superposition von Zuständen und der Nichtlokalität. Die Autoren stellen eine quantentheoretische Beschreibung des Experiments vor und gehen dabei sehr genau auf den Phasenfaktor $q(\varphi)$ ein. Auf diese Behandlung wird mit Schülerinnen und Schülern aufgrund fehlender mathematischer Vorkenntnisse und vor allem aus Zeitgründen verzichtet. Wir folgern mit den Lernenden aus dem Interferenzexperiment also die Nichtlokalität, thematisieren aber nicht die Superposition von Quantenzuständen.

2.5.2 Technisch-experimentelle Grenzen des Konzepts

Parametrische Abwärtskonversion Der PDC-Prozess wird im Unterricht, wie bereits im Abschnitt 2.3 dargelegt, nur hinsichtlich der Energie- und der Impulserhaltung thematisiert. Dass dieser Prozess in der Praxis tatsächlich nur mit sehr kleiner Wahrscheinlichkeit eintritt ($\approx 10^{-12} - 10^{-5}$) [44], wird den Lernenden gegenüber nicht thematisiert. Die nicht-lineare Optik wird nicht angesprochen und auch Details, wie Konvertierungstyp, Phasenanpassung oder Geometrie des nicht-linearen Kristalls werden nicht diskutiert. Eine Vorstellung des PDC-Prozesses in Analogie zur atomaren Anregung und einem Grundzustandsübergang wird gelten gelassen, denn auch in der Fachwissenschaft wird die Energieerhaltung beim PDC-Prozess häufig so veranschaulicht, z.B. bei [44, 94]. Die Schülerinnen und Schüler kennen das Prinzip der atomaren Anregung bereits und so steigt die Akzeptanz der Lernenden für den nicht-linearen Kristall, wie wir im Rahmen einer Akzeptanzbefragung sehen werden (vgl. Kapitel 3).

Konzept der Gleichzeitigkeit Eine Koinzidenz wird im Rahmen des Unterrichtskonzepts definiert als das gleichzeitige Klicken von mindestens zwei Detektoren. Mit Hilfe einer Koinzidenz kann auf die parametrische Fluoreszenz im Kristall zurückgeschlossen werden, weil die Photonen quasi-instantan emittiert werden [37]. Würde man das gleichzeitige Klicken ernst nehmen, so müsste der Zeitversatz zwischen zwei Klicks Null sein. Erst ein Koinzidenzzeitfenster $\tau_c > 0$ führt aber auf eine von Null verschiedene Wahrscheinlichkeit überhaupt Koinzidenzen zu messen. Der Begriff der Gleichzeitigkeit muss also in Experimenten mit angekündigten Photonen entschärft werden. Dieses technische Detail ist entscheidend, sonst würden im Experiment keine Koinzidenzen gemessen, wird mit Schülerinnen und Schülern aber nicht problematisiert. Das Auftreten zufälliger Koinzidenzen hingegen wird mit den Schülerinnen und Schülern angesprochen und auch auf dem zugehörigen Arbeitsblatt festgehalten.

Auswerteelektronik Für die Entwicklung der Koinzidenzmethode erhielt Walther Bothe 1954 den Nobelpreis [152] und für die Durchführung von Experimenten mit angekündigten Photonen ist die Koinzidenzmessung fundamental. Es gibt heute eine Reihe von Möglichkeiten Koinzidenzelektroniken zu implementieren:

- Zeit-Amplituden Wandler, deren Ausgangssignal proportional zum Zeitintervall zwischen einem Start- und einem Stoppsignal ist, z.B. [57].
- Diskrete Logik, auch mit NIM-Modulen, z.B. [22]. Auf feste Länge geformte Eingangssignale werden verknüpft und ein Signal wird im Fall einer Überlappung ausgegeben. Gezählt werden dann die Ausgangssignale.
- Zeit-Digital-Wandler nutzen Zeitstempel eingehender Signale, die mit einer Auswertesoftware verglichen und ausgewertet werden, z.B. [212].
- FPGA (Field Programmable Gate Array), z.B. [214, 21]. Integrierte Schaltkreise mit verschiedenen Gatter-Typen, die durch Programmierung miteinander verschaltet werden können.

In den Einzelphotonenexperimenten des hier vorgestellten Unterrichtskonzepts, die von Bronner in interaktive Bildschirmexperimente umgesetzt wurden, erfolgt die Datenerfassung teilweise mit Logikbauteilen aus der Teilchenphysik, teilweise mit einem Zeit-Digital-Wandler und einer Software. Letzterer ermöglicht es, aus dem Datenstrom Einzeldaten zu nutzen, um ein Lämpchen auf dem Detektorgehäuse im Falle eines registrierten Ereignisses aufleuchten zu lassen [26, 27, 28]. Die Koinzidenzelektronik wird im hier vorgestellten Unterrichtsvorschlag nicht thematisiert.

Justage der Experimente Zur vereinfachten der Experimente und für die Fasereinkopplung werden Spiegel verwendet. Diese werden mit den Lernenden besprochen. Allerdings wird die detailgetreue Justage nicht weitergehend thematisiert. Eine ausführliche Beschreibung zum Aufbau der entsprechenden Experimente findet man in der Arbeit von [26] und ein Arbeitsblatt, welches die Besprechung im Unterricht grundsätzlich ermöglicht, steht für interessierte Lehrkräfte bereit.

2.5.3 Anschlussfähigkeit des Konzepts

Trotz der in Abschnitt 2.5.1 und 2.5.2 benannten fachlichen Grenzen, die bei der Entwicklung der Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik im Sinne einer didaktischen Reduktion in Kauf genommen wurden, werden im vorgeschlagenen Unterrichtsgang keine Begriffe verwendet, die nicht anschlussfähig werden. In der Entwicklung des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik war Anschlussfähigkeit ein zentraler Aspekt. Aufbauend auf dem Verständnis der grundlegenden theoretischen und experimentellen Aspekte der modernen Quantenphysik bieten sich Ausblicke in die Quantenkommunikation oder auf den Quantencomputer an, insbesondere im fächerverbindenden Unterricht mit der Informatik [160, 178]. Die Vermittlung solcher Quantentechnologien kann im Physikunterricht aufbauend auf das Erlanger Unterrichtskonzept problemlos erfolgen, wenn der quantenphysikalische Zustandsbegriff noch ergänzend behandelt wird. Hierzu gibt es erste Vorarbeiten, beispielsweise anknüpfend an [5].

2.6 Sachstruktur des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik

Gegliedert ist das Unterrichtskonzept in vier Unterrichtsstunden, die sich am Experiment von [69] orientieren (vgl. Abbildung 2.5). Es werden die Wesenszüge der Quantenphysik *Statistische Vorhersagen* und *Fähigkeit zur Interferenz* qualitativ erarbeitet, genauso wie Begriffe wie Präparation und Eigenschaft in der Quantenphysik:

1. Unterrichtsstunde: Einzelphotonendetektoren
2. Unterrichtsstunde: Koinzidenzmessung
3. Unterrichtsstunde: Antikorrelation am halbdurchlässigen Spiegel
4. Unterrichtsstunde: Einzelphotoneninterferenz

In den nachfolgenden Abschnitten wird die interne Struktur der einzelnen Stunden detaillierter beschrieben. Ein vorgeschlagenes Rahmenartikulationsschema sowie alle Arbeitsblätter liegen dieser Arbeit in Anhang A bei. Ein Erklärvideo und die im Unterricht eingesetzten interaktiven Bildschirmexperimente liegen dieser Arbeit mit der Daten CD sortiert für jede Unterrichtsstunde bei.

2.6.1 Unterrichtsstunde 1: Einzelphotonendetektoren

Zum Einstieg in das Unterrichtskonzept wird ein selbst entwickeltes Erklärvideo gezeigt. Das Erklärvideo wurde gemäß der Qualitätskriterien von Kulgemeyer erarbeitet [116, 115, 114, 113]⁷. Es motiviert zur Beschäftigung mit Quantenobjekten und -phänomenen mittels Quantencomputern und Datensicherheit: Die Bedeutung der Datensicherheit wird zuvor mit den Jugendlichen anhand zweier Zeitungsartikel kurz diskutiert und der Einfluss der Quantenphysik auf die Datensicherheit wird im Erklärvideo noch einmal aufgegriffen.

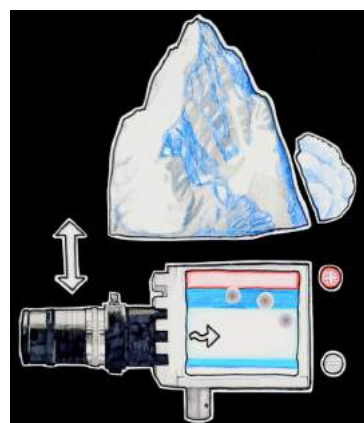


Abbildung 2.6: Ausschnitte aus dem Erklärvideo. Links: Die Datensicherheit und die Quantencomputer dienen als Einstieg ins Thema. Rechts: Darstellung der Schneelawinenanalogie zur Erläuterung der Funktionsweise der Einzelphotonendetektoren [49].

⁷Didaktische und instruktionspsychologische Grundlagen zur Entwicklung dieses Erklärvideos wurden bereits veröffentlicht in [49].

2.6. SACHSTRUKTUR DES ERLANGER UNTERRICHTSKONZEPTS ZUR QUANTENOPTIK

Im Erklärvideo werden die Lernenden weiter Schritt für Schritt durch die Entsprechungen einer Analogie zum Entstehen und Abgehen von Schneelawinen geleitet, mit deren Hilfe die Schülerinnen und Schüler die Funktionsweise der Detektoren verstehen. Die Schülerinnen und Schüler vervollständigen auf dem zugehörigen Arbeitsblatt (siehe Anhang A) zeitgleich eine Tabelle und stellen dadurch eine Verbindung zwischen Objekt- und Analogbereich her:

| Avalanche Photo Diode | Schneelawine |
|---|---|
| Elektronen auf hohem elektrischem Potential (metastabiler Zustand) | Schnee auf hohem Gravitationspotential (metastabiler Zustand) |
| Eine kleine in den Detektor fallende Energiemenge genügt, um die Elektronen freizusetzen. | Eine kleine mechanische Störung genügt, um die Schneemassen freizusetzen. |
| Freigesetzte Ladungsträger setzen weitere Ladungsträger frei. | Eine sich bergab bewegende Lawine nimmt weiteren Schnee auf. |
| Totzeit | Zeit, bis sich wieder Schnee auf dem Berg angesammelt hat. |
| Dunkelzählereignis | Spontaner Schneeabgang |

Abbildung 2.7: Schneelawinenanalogie zur Erklärung der Funktionsweise von Einzelphotonendetektoren auf dem Niveau der Sekundarstufe II [10].

Im Anschluss an das Erklärvideo und die Besprechung der Schneelawinenanalogie im Unterrichtsgespräch kommt ein interaktives Bildschirmexperiment zum Einsatz. Schülerinnen und Schüler lernen die Zählrate der Detektoren als die gemessene physikalische Größe in den Quantenoptikexperimenten mit der Einheit Hertz kennen. Sie sehen außerdem in einer Laborsituation, was die Dunkelzählrate ist und erarbeiten durch das Hinzufügen und Wegnehmen von Bandpassfiltern die Proportionalität von der Zahl der Klicks eines Detektors und der Intensität des einfallenden Lichts.

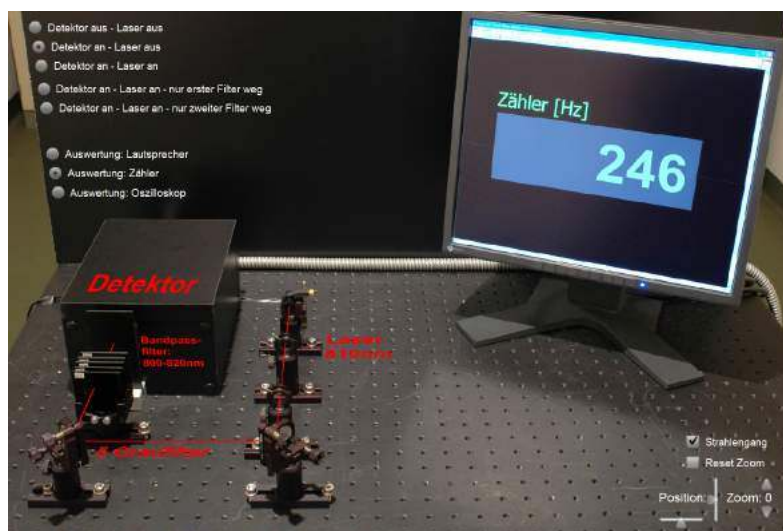


Abbildung 2.8: IBE zur Funktionsweise der Einzelphotonendetektoren [28].

2.6.2 Unterrichtsstunde 2: Koinzidenzmessung

Mit einem grundlegenden Verständnis dafür, wie Einzelphotonendetektoren funktionieren, wird in einem nächsten Schritt die Koinzidenzmessung als grundlegende Messtechnik der Quantenoptik von den Lernenden eigenständig erarbeitet. Ein Klick eines einzelnen Detektors resultiert nicht unbedingt aus einem Photon, sondern kann auch einem Dunkelzählungsereignis entsprechen, wie die Schülerinnen und Schüler in der ersten Unterrichtsstunde gelernt haben. Der Begriff der Koinzidenz wird durch ein Arbeitsblatt eingeführt, in dem die Klicks zweier Detektoren (Alice und Bob genannt) auf einer Zeitachse dargestellt werden, wobei die Strichbreite 100ns entspricht. Jeder Strich entspricht einem elektrischen Signal des zugehörigen Detektors.

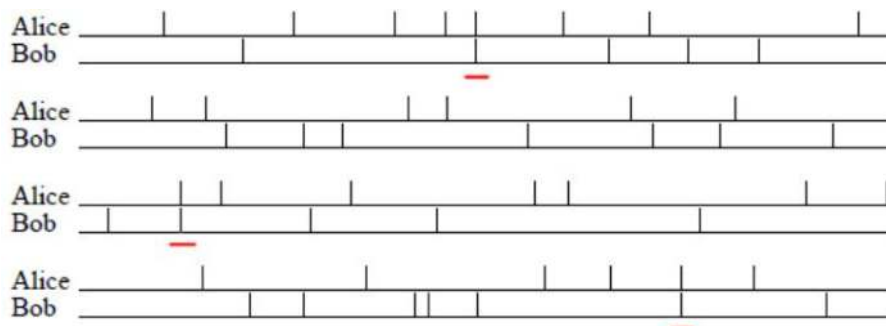


Abbildung 2.9: Auszug aus dem Arbeitsblatt zur Koinzidenzmessung. Die koinzidenten Ereignisse sind hier zur Verdeutlichung rot unterstrichen. Abbildung bereits publiziert in [14].

Die Lernenden erhalten die Aufgabe, sich das Blatt genau anzusehen und Besonderheiten aufzuschreiben. Im Unterrichtsgespräch wird herausgearbeitet, dass die Klicks unregelmäßig (poisson-)verteilt sind, beide Detektoren unabhängig voneinander klicken und, dass viele Klicks bei Alice und Bob genau „übereinander“ liegen, also zeitgleich erfolgen. Damit können die Schülerinnen und Schüler auf die parametrische Fluoreszenz im nicht-linearen Kristall schließen: Die Lernenden verstehen, dass die Koinzidenzen die Einzelphotonen-Experimente definieren und lernen die Rolle des Triggerdetektors kennen. Nachdem ein Lückentext zur Koinzidenzmessung gemeinsam zur Ergebnissicherung ausgefüllt wurde (für das Arbeitsblatt siehe Anhang A), wird das Koinzidenzexperiment als interaktives Bildschirmexperiment durchgeführt.



Abbildung 2.10: IBE zum Koinzidenzexperiment von [28].

2.6.3 Unterrichtsstunde 3: Antikorrelation am halbdurchlässigen Spiegel

Das Verhalten von klassischem Licht (in der Modellvorstellung *elektromagnetische Welle*), beispielsweise eines Lasers, an einem halbdurchlässigen Spiegel (Laborsprache: Strahlteilerwürfel) wird in einem Realexperiment untersucht. Die Schülerinnen und Schüler halten ihre Beobachtung fest und lernen den Strahlteilerwürfel als ein optisches Bauelement kennen. Daran anknüpfend, soll das Verhalten einzelner Photonen am Strahlteilerwürfel untersucht werden. Dazu erarbeiten die Schülerinnen und Schüler in Gruppenarbeit zunächst eigene Vorschläge zur experimentellen Erweiterung des Koinzidenzexperimentes aus Abbildung 2.10). Sie wiederholen dabei grundlegende Begriffe der ersten beiden Unterrichtsstunden, wie z.B. den des Dunkelzählereignisses. Nachdem der benötigte experimentelle Aufbau von den Lernenden selbstständig erarbeitet wurde (vgl. Abbildung 2.4), wird mit den Lernenden ein Widerspruchsargument geführt: Das Auftreten einer Triplekoinzidenz würde bedeuten, dass gleichzeitig der Detektor am reflektierten, als auch der am transmittierten Ausgang des Strahlteilerwürfels koinzident mit Bob klickt. Die Schülerinnen und Schüler interpretieren das so: das Photon wird am Strahlteilerwürfel geteilt. Im zugehörigen interaktiven Bildschirmexperiment sehen die Lernenden, dass die Rate der Triplekoinzidenzen sehr klein ist gegen die anderen Zählraten. Gemeinsam mit den Lernenden wird unter Einbezug elementarstochastischer Überlegungen begründet, dass die im Experiment auftretenden Triplekoinzidenzen auf zufällige Koinzidenzen zurückgeführt werden können, Photonen also am Strahlteilerwürfel unteilbar sind. Dazu ist es notwendig, die Zählraten gemeinsam mit den Schülerinnen und Schülern genauer zu untersuchen.

Mit den Schülerinnen und Schülern werden dazu zunächst zwei grundlegende Zusammenhänge thematisiert⁸:

⁸Diese Überlegungen wurden bereits bei [10, 14] veröffentlicht.

2.6. SACHSTRUKTUR DES ERLANGER UNTERRICHTSKONZEPTS ZUR QUANTENOPTIK

1. Der Zusammenhang zwischen der Anzahl der Detektionsereignisse N_X und der Wahrscheinlichkeit für eine Detektion P_X am Detektor X ergibt sich aus der Gesamtzahl der durchgeführten Versuche. Diese ist bei Experimenten mit angekündigten Photonen durch die Zahl der Detektionsereignisse des Triggerdetektors gegeben, also z.B. der Zählrate von Bob. Mit Hilfe einfacher Prozentrechnung lässt sich dies genauer erklären: Die Wahrscheinlichkeit der Detektion entspricht dem Prozentsatz, die Anzahl der Experimente entspricht dem Grundwert:

$$N_X = P_X \cdot N_B$$

wobei N_B die Anzahl der Detektionsereignisse bei Bob ist.

2. Im Kapitel zum Koinzidenzexperiment beobachteten die Schülerinnen und Schüler, dass die Impulse an den Detektoren zufällig verteilt und unabhängig voneinander sind. Am Beispiel des Werfens von zwei fairen Münzen werden die Lernenden dann an die stochastische Unabhängigkeit zweier Ereignisse erinnert. Unter der Annahme zufälliger und unabhängiger Impulse an zwei Detektoren kann man für die Wahrscheinlichkeit eines koinzidenten Ereignisses an den Detektoren A und B schreiben:

$$P_{AB} = P_A \cdot P_B.$$

Im interaktiven Bildschirmexperiment sehen die Schülerinnen und Schüler, dass die Rate der Triplekoinzidenzen von Null verschieden, aber sehr klein im Verhältnis zu den übrigen Zählraten ist. Die Frage, ob diese zufällig sind, wird mit Hilfe der Vorüberlegungen 1. und 2. geklärt: Die Wahrscheinlichkeit für eine Triplekoinzidenz am Trigger Bob (B) und an den Detektoren am reflektierten (R) und am transmittierten Ausgang (T) des Strahlteilerwürfels ist:

$$P_{RTB} \stackrel{(2)}{=} P_{RB} \cdot P_{TB}.$$

Diese Gleichung lässt sich mit (1) umschreiben in eine Gleichung, in der nur noch messbare Zählraten vorkommen. Es kann je nach Unterrichtssituation notwendig sein, dass diese Phase innerhalb des Unterrichts von der Lehrkraft angeleitet wird:

$$\begin{aligned} \underbrace{P_{RTB}}_{\cdot N_B^2} &= \underbrace{P_{RB}}_{\cdot N_B} \cdot \underbrace{P_{TB}}_{\cdot N_B} \\ N_{RTB} \cdot N_B &\stackrel{(1)}{=} N_{RB} \cdot N_{TB} \\ \frac{N_{RTB} \cdot N_B}{N_{RB} \cdot N_{TB}} &= 1, \end{aligned}$$

für zufällige und unabhängige Pulse an den Detektoren. Der Bruch definiert den *Antikorrelationsfaktor*

$$\alpha := \frac{N_{RTB} \cdot N_B}{N_{RB} \cdot N_{TB}}.$$

Der Begriff der Antikorrelation wird diskutiert: Die Schülerinnen und Schüler sehen im Falle des Experiments von Laserlicht am Strahlteilerwürfel, dass hier Triplekoinzidenzen die Regel sind und daher $\alpha = 1$. Man führt hier den Begriff der Korrelation von klassischem Licht am Strahlteilerwürfel ein (klassische Welt $\alpha \geq 1$). Im Fall von $N_{RTB} = 0$ ist

$\alpha = 0$ und man spricht von Antikorrelation am halbdurchlässigen Spiegel (Quantenwelt $\alpha < 1$). Die Schülerinnen und Schüler diskutieren in der Folge über die Frage, welche Werte für α sie im Experiment mit einzelnen Photonen erwarten.



Die Lernenden bringen dabei verschiedene Gedanken in die Analyse und Interpretation von Daten ein und lernen, dass Beobachtungen immer mit eigenen Interpretationen angereichert werden müssen [119, 156].

Die anschließende Messung von α im entsprechenden IBE schließt die Argumentation zur Unteilbarkeit von Photonen ab.

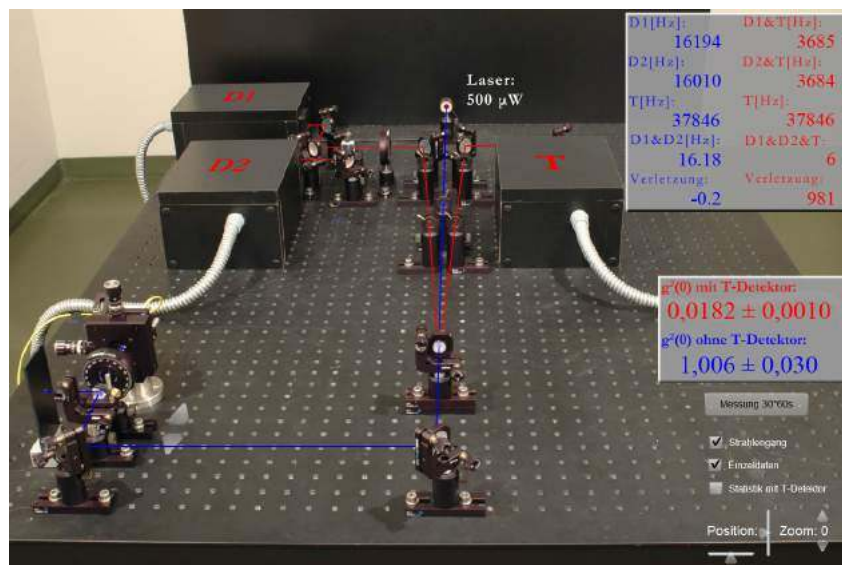


Abbildung 2.11: IBE zur Messung des Antikorrelationsfaktors [28].

Im Anschluss wird der Quantenzufall diskutiert und zwar mit Hilfe eines Bildschirmexperiments, das eine Statistik anfertigt über Transmission und Reflexion einzelner Photonen am Strahlteilerwürfel. Dabei wird betont, dass es in der Quantenphysik keine objektiv tieferliegende Ebene der Erkenntnis gibt, die eine Vorhersage ermöglichen könnte, ob ein einzelnes Photon am halbdurchlässigen Spiegel nun transmittiert oder reflektiert wird [144, 143], um die klare Abgrenzung zum Determinismus in der klassischen Physik zu betonen. Der Wesenszug der Quantenphysik *Statistische Vorhersagbarkeit* aus Kapitel 1 wird als Merksatz formuliert.

2.6.4 Unterrichtsstunde 4: Einzelphotoneninterferenz

Gemeinsam mit den Schülerinnen und Schülern wird zunächst die folgende Aussage von Einstein gelesen, die er in seinem Aufsatz „Über einen die Erzeugung und Umwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Standpunkt“ niederschrieb:

„Nach der hier ins Auge zu fassenden Annahme ist bei Ausbreitung eines von einem Punkte ausgehenden Lichtstrahles die Energie nicht kontinuierlich auf größer und größer werdende Räume verteilt, sondern es besteht dieselbe

2.6. SACHSTRUKTUR DES ERLANGER UNTERRICHTSKONZEPTS ZUR QUANTENOPTIK

aus einer endlichen Zahl von in Raumpunkten lokalisierten Energiequanten, welche sich bewegen, ohne sich zu teilen und nur als Ganze absorbiert und erzeugt werden können.“ [52]

Im Unterrichtsgespräch wird mit den Schülerinnen und Schülern abgeleitet, welche Eigenschaften Einstein den Lichtquanten hier zuschreibt, z.B.:

- Lichtquanten sind unteilbar
- Lichtquanten bewegen sich
- Lichtquanten sind lokalisiert
- ...

Dass Photonen lokalisierbar sind, würde bedeuten, dass ihnen die Eigenschaft Ort zugeschrieben werden kann. Dass dies in der Quantenphysik nicht zulässig ist, wird im Anschluss anhand einzelner Photonen im Michelson-Interferometer erarbeitet. Dazu werden im ersten Schritt die Begriffe Interferenz und Interferometer wiederholt bzw. eingeführt. Die Lernenden diskutieren zunächst in Partnerarbeit, was im Experiment mit einzelnen Photonen im Michelson-Interferometer erwartet wird. Die unter den Lernenden verbreitete Vorstellung unteilbarer Energieportionen, die einen Ort, also auch Trajektorien besitzen, führt häufig darauf, dass keine Interferenz erwartet wird, was der späteren Beobachtung im Bildschirmexperiment widerspricht. Die Vorstellung der Lokalisierbarkeit muss fallen gelassen werden und es wird klar, dass Quantenobjekte Eigenschaften nicht permanent „besitzen“. Im abschließenden Experiment nach Grangier, Roger und Aspect wird die Antikorrelation am Strahlteilerwürfel und die Einzelphotoneninterferenz gleichzeitig gezeigt [69]. Der Wesenszug *Fähigkeit zur Interferenz* aus Kapitel 1 wird als Merksatz formuliert und am Beispiel des Michelson-Interferometers diskutiert. Photonen werden letztlich als unteilbare Energieportionen definiert, die keinen Ort besitzen. Auch dies wird als Merksatz festgehalten:

„Photonen sind unteilbare Energieportionen, die nicht (permanent) lokalisierbar sind.“

Abschließend wird der Präparationsgedanke aus Unterrichtsstunde 2 noch einmal aufgegriffen und es wird über eine Ortspräparation gesprochen. So schließt sich der Kreis zum Anfang des Konzepts, denn mit Hilfe der Detektoren und der Koinzidenztechnik kann eine Präparation der Eigenschaft Ort am Quantenobjekt Photon vorgenommen werden. An dieser Stelle könnte in aufbauenden Stunden direkt mit dem Zustandsbegriff in der Quantenphysik und dem Messproblem angeschlossen werden. Damit wären dann alle Vorbereitungen für die Behandlung von Quantenkryptographie oder des Quantencomputings getroffen.

2.7 Zusammenfassung und Standortbestimmung

Wir haben in den ersten beiden Kapiteln dieser Arbeit nun zunächst aktuelle Ergebnisse der fachdidaktischen Forschung zum Quantenphysikunterricht zusammengestellt. Die daraus gefolgerten Anforderungen an ein neues Curriculum wurden bei der Entwicklung des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik berücksichtigt. Mit dem neuen Konzept soll der Versuch unternommen werden, Lernende der gymnasialen Oberstufe so in die Quantenphysik einzuführen, dass sie anschlussfähiges Wissen entwickeln und in der Lage sind Grundlagen von Quantentechnologien zu begreifen (inhaltliche Perspektive). Im Zusammenhang damit wurden Erkenntnisse der modernen Quantenphysik didaktisch aufbereitet und zwar ausgehend von u.a.

1. der Lernendenperspektive, d.h. unter Berücksichtigung verbreiteter Lernschwierigkeiten zur Quantenphysik und
2. der Lehrendenperspektive, d.h. unter Berücksichtigung des in einer Delphi-Studie von Lehrkräften artikulierten Bedarfs an Ergebnissen aus modernen Experimenten zur Quantenphysik, die zur Vermittlung der Wesenszüge der Quantenphysik geeignet und mit Arbeitsmaterial angereichert sind.

Wir wollen nun dieses Unterrichtskonzept nutzen, um in weiteren Teilen dieser Arbeit einen Beitrag zur Klärung zweier grundsätzlichen Fragen zu leisten:

1. Ist der Zugang über moderne quantenoptische Experimente überhaupt dazu geeignet, Lernende der gymnasialen Oberstufe in die Quantenphysik einzuführen?
2. Wenn ja, wird das Konzept dem Anspruch gerecht, Lernenden die Bedeutung der Quantenphysik für das gesellschaftliche Leben heute und in Zukunft aufzuzeigen? Das heißt, welche Vorstellungen zu zentralen Aspekten der Quantenphysik entwickeln die Lernenden auf diese Weise?

Wir nähern uns diesen Fragen mit einer umfangreichen summativen Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik (ab Kapitel 4): wir klären, inwiefern Lernende das Konzept interessant finden (affektive Komponente), inwiefern sie ein Begriffswissen zur Quantenphysik entwickeln und welche Vorstellungen feststellbar sind.

Davor wird das Unterrichtskonzept aber einer formativen Evaluation unterworfen: mittels Akzeptanzbefragungen mit einzelnen Schülerinnen und Schüler können so zunächst Lernbarrieren des neu entwickelten Konzepts aufgedeckt und das Konzept in der Folge adaptiert werden. Dabei sollten insbesondere die auf Experimente bezogenen Elementarisierungen, wie sie in diesem Kapitel dargestellt wurden, auf ihre Lernförderlichkeit hin untersucht werden, weil hierzu noch keinerlei empirische Erkenntnisse vorliegen. Die Ergebnisse dieser formativen Evaluation berichten wir im nächsten Kapitel.

2.7. ZUSAMMENFASSUNG UND STANDORTSBESTIMMUNG

KAPITEL 3

Formative Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik

„When the cook tastes the soup,
that's formative; when the guests
taste the soup, that's summative“

- Bob Stake (zit. n. Scriven, 1991)

Einordnung in den Kontext der Arbeit

Vor einer summativen Evaluation des neu entwickelten Konzepts zur Quantenoptik wurde entwicklungsbegleitend eine formative Evaluation durchgeführt. Die Methode der Akzeptanzbefragung ist dazu geeignet, denn so können in einem frühen Entwicklungsstadium Verbesserungen am Konzept erzielt werden, indem Informationsverarbeitungsprozesse einzelner Lernender rekonstruiert werden. Insbesondere die Wirkung der quantenoptischen Experimente auf Lernende konnte so empirisch voruntersucht werden. Dies ist wichtig, denn die Ergebnisse liefern nicht nur Einblicke in mögliche Lernbarrieren, sondern sie legitimieren gleichzeitig die Behandlung von Quantenoptik in der gymnasialen Oberstufe. Der Beantwortung grundlegender Fragen, wie beispielsweise die, inwiefern Schülerinnen und Schüler in der Lage sind, quantenoptische Konzepte mit Hilfe der vorgenommenen Elementarisierungen zu verstehen, kann man sich auf diese Weise nähern. Es zeigt sich: Lernende der gymnasialen Oberstufe sind quantenoptischen Konzepten gegenüber unvoreingenommen. Die genauen Ergebnisse der Akzeptanzbefragung und die daran anschließenden Überarbeitungen des Erstentwurfs des Konzepts werden in diesem Kapitel vorgestellt. Der überarbeitete Konzeptentwurf wurde dann in einer umfangreichen summativen Evaluation unterworfen, die ab Kapitel 4 vorgestellt wird. Die Inhalte dieses Kapitels wurden bereits publiziert in [14].

3.1 Die Methode der Akzeptanzbefragung

Scriven unterscheidet im Kontext von Curriculumsevaluation verschiedene Rollen, die die Evaluation einnimmt: sie kann zur Curriculumsentwicklung genauso eingesetzt werden, wie zur Evaluationen eines zuvor entwickelten Endprodukts [189]. In diesem Kontext führte er die Begriffe der formativen und der summativen Evaluation ein.

Unter formativer Evaluation versteht Scriven eine solche, die der Verbesserung des zu entwickelnden Curriculums dient [189]. Er unterscheidet sie von summativer Evaluation, die vor allem als Ausgangspunkt genutzt wird, um unterschiedliche Curricula zu vergleichen (ebd.):

„Evaluation may be done to provide feedback to people who are trying to improve something (formative evaluation); or to provide information for decision-makers who are wondering whether to fund, terminate, or to purchase something (summative evaluation).“ [132, S. 41]

Die beiden Evaluationsansätze richten sich an unterschiedliche Adressaten: während die formative Evaluation vor allem den Entwickelnden mit dem Ziel einer Verbesserung bei der Konzepterarbeitung dient, ist die summative Evaluation vor allem entscheidend bei der Auswahl von einem unter mehreren Curricula, Konzepten, o.ä. - also eine Entscheidungshilfe [132].

Für die formative Evaluation des hier dargestellten Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik stellt die Akzeptanzbefragung eine geeignete Erhebungsmethode dar: Entwickelt von Jung [92] und weiterentwickelt von Wiesner sowie Wodzinski [221], dient die Methode der Akzeptanzbefragung insbesondere der Entwicklung von Unterrichts- und Lehrkonzepten. Bekannt ist die Methode der Akzeptanzbefragung auch unter dem Begriff „Teaching Experiments“, wie zum Beispiel bei [36, 196, 102]. In vielen Bereichen der didaktischen Forschung - nicht nur in der Physik - wurden Akzeptanzbefragungen zur Entwicklung von Unterrichtsansätzen eingesetzt [35, 72, 124, 218, 227], aber auch für andere Forschungsbereiche, zum Beispiel zur Erhebung von pädagogischem Wissen von Physiklehrkräften [219].

Didaktisch entwickelte Erklärungsansätze zu bestimmten Themengebieten (hier der Quantenoptik) werden dabei in einer Kombination aus Interventions- und Befragungsphasen mit einzelnen Schülerinnen und Schülern eingesetzt, um zu untersuchen, ob diese von den Schülerinnen und Schülern akzeptiert und verstanden werden [34, S. 127]. Phasen des Informationsangebots, in denen eine Konfrontation von Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler mit neuen Konzepten geschieht, schließen sich Interviewsituationen an. Diese dienen der Analyse von Interaktionseffekten der zuvor vermittelten Instruktionselemente mit den Vorstellungen der Lernenden [71, S. 32]. Die Akzeptanzbefragung erlaubt also ein Nachzeichnen der Lernverläufe individueller Schülerinnen und Schüler, sodass Rückschlüsse auf mögliche Lernhürden gewonnen werden können [53]. Auf der Grundlage dieser Erkenntnisse kann eine gezielte Weiterentwicklung des Konzepts erfolgen.

3.1. DIE METHODE DER AKZEPTANZBEFRAGUNG

In der physikdidaktischen Forschung hat sich ein Ablaufschema von Akzeptanzbefragungen etabliert: demnach bestehen Akzeptanzbefragungen aus vier Phasen, die zyklisch durchlaufen werden [71, 53, 34] und die auf Blumör zurückgehen [16]:

1. Informationsangebot: Erläuterungen und Erklärungen werden vom Interviewer vermittelt und an den Lernenden weitergegeben. Dabei können insbesondere Medien zum Einsatz kommen, wie sie auch im Unterricht zum Einsatz kämen.
2. Befragung nach Akzeptanz: Im Anschluss an die Informationsphase werden die Lernenden nach der Akzeptanz befragt. Diese geben dann begründet Auskunft darüber, ob sie die Erklärungen geeignet fanden, oder erläutern, was sie an der jeweiligen Erklärung irritiert hat.
3. Paraphrasierung: Im Anschluss an die Befragung nach Akzeptanz geben die Befragten den zuvor geschilderten Sachverhalt bzw. die vorher gehörte Erklärung in eigenen Worten wider.
4. Anwendungsphase: Die Befragten bekommen Aufgaben zur Anwendung des Gelernten gestellt und bearbeiten diese.

Jeder der Befragungszyklen behandelt je einen Baustein des Konzepts, der auch als *Key-Idea* bezeichnet wird [71, 227]. Dieser Fachbegriff aus der englischsprachigen Fachliteratur wird hier wie üblich ohne Übersetzung übernommen.

Bei den im Rahmen dieser Erhebung durchgeführten Akzeptanzbefragungen lag der Schwerpunkt auf der Evaluation der erarbeiteten Erklärungsansätze zu wesentlichen experimentellen Bausteinen des geplanten Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik. Außerdem sollte ganz grundsätzlich die Frage geklärt werden, wie quantenoptische Realexperimente - und die dabei verwendeten, für Schülerinnen und Schüler völlig neuartigen Geräte - auf die Lernenden wirken. Außerdem soll untersucht werden, ob die didaktische Rekonstruktion der Quantenoptik für das Niveau der gymnasialen Oberstufe gelungen ist, bzw. an welchen Stellen Verständnishürden oder Unklarheit bestehen. Daher wurde auf den vierten Schritt, nämlich die Anwendungs- bzw. Transferphase, verzichtet.



Was ist das hier abgebildete Konstrukt *Akzeptanz*? Bei quantitativen Erhebungen ist es entscheidend, das zu messende Konstrukt hinreichend zu operationalisieren. Dazu müsste in diesem Fall zunächst geklärt werden, was unter *Akzeptanz* eigentlich verstanden wird. Mit der Durchführung der Methode der Akzeptanzbefragung geht aber gar nicht der Anspruch einher, das Konstrukt *Akzeptanz* valide zu erheben, sondern: Posner et al. formulierten in ihrem bekannten Aufsatz Bedingungen, die erfüllt sein müssen, damit Lernende kognitive Strukturen verändern, um ein wissenschaftliches Konzept anzunehmen [159]. Dazu zählen unter anderem, dass ein neues Konzept von Anfang an plausibel und den Schülerinnen und Schülern einleuchtend sein muss. Das, was Posner et al. unter *plausibel* und *einleuchtend* verstehen, soll hier mit dem Begriff *Akzeptanz* erfasst werden. Positive Ergebnisse in der Akzeptanzbefragung würden zeigen, dass die Bedingungen *einleuchtend* und *plausibel* durch die im Unterrichtskonzept zur Quantenoptik vorgestellten Elementarisierungen prinzipiell erfüllt werden können. Dies legitimiert einen Einsatz des Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik in der gymnasialen Oberstufe im größeren Umfang.

3.2 Stichprobe, Forschungsfragen und Ablauf der Erhebung

Stichprobe: Durchgeführt wurden Akzeptanzbefragungen mit $N = 13$ Schülerinnen und Schüler der gymnasialen Oberstufe; diese hatten eine Dauer von ca. zwei Schulstunden. Die einzelnen Akzeptanzbefragungen wurden aufgezeichnet und transkribiert. Keiner bzw. keine der Lernenden hatte Vorkenntnisse in Quantenoptik und zuvor auch keine oder nur wenige unterrichtliche Einblicke in die Quantenphysik erhalten. Als externes Kriterium wurden die letzten zwei Zeugnisnoten im Fach Physik der Probandinnen und Probanden notiert und ihr Mittelwert gebildet ($m = 2.04$; $SD = 1.03$).

Forschungsfragen: Die folgenden Forschungsfragen sollten mit Hilfe der Akzeptanzbefragungen beantwortet werden:

- FF 1: Wie wirken quantenoptische Realexperimente auf die Lernenden und welche experimentellen Komponenten finden sie besonders interessant?
- FF 2: Akzeptieren die Schülerinnen und Schüler die Erklärung der grundlegenden Funktionsweise von Einzelphotonendetektoren und können die Lernenden diese in eigenen Worten wiedergeben?
- FF 3: Akzeptieren die Schülerinnen und Schüler die Erklärung zum Koinzidenzbegriff und können die Lernenden diese in eigenen Worten wiedergeben?
- FF 4: Akzeptieren die Schülerinnen und Schüler die Herleitung und Bedeutung des Antikorrelationsfaktors und können die Lernende diese in eigenen Worten wiedergeben?

FF 5: Mit welchen Lernschwierigkeiten ist bei der Durchführung des Unterrichtskonzepts zu rechnen?

Ablauf der Erhebung: Zur Klärung der Forschungsfragen genügt es nicht, den Schülerinnen und Schülern die Erklärungen zu den hier genauer zu beforschenden Inhaltsbereichen *Funktionsweise der Einzelphotonendetektoren*, *Koinzidenzbegriff* und *Antikorrelationsfaktor* zu präsentieren, denn dann fehlt der Kontext, wie er im Unterricht vermittelt würde. Es wurden deswegen sämtliche, auf das Experiment bezogene Aspekte mit in die Befragungszyklen einbezogen. Konkret also auch der nicht-lineare Kristall, optische Komponenten zur Justage oder beispielsweise der Strahlteilerwürfel. Der so erhaltene Gegenstandsbereich wurde für die Durchführung der Akzeptanzbefragungen in 7 Key-Ideas unterteilt, wobei der Fokus auf den drei oben genannten Aspekten (hier fett) lag:

1. Komponenten quantenoptischer Experimente
2. Der BBO-Kristall
3. **Detektion von Licht: Beobachter statt Empfänger**
4. Feinjustage quantenoptischer Experimente
5. **Der Koinzidenzbegriff: Präparation von Quantenzuständen**
6. Einzelne Photonen am Strahlteilerwürfel
7. **Der Antikorrelationsfaktor: Antikorrelation am Strahlteilerwürfel**

Die Akzeptanzbefragungen gliederten sich folglich in sieben Zyklen des in Abschnitt 3.1 erläuterten Vierschritts. Jeder Zyklus begann mit den Erklärungen zum jeweiligen Themenblock, jeweils gefolgt von einer Befragung zur Akzeptanz (z.B. „Wie fandest du die bisherige Erklärung der Naturwissenschaftler zu xy? Ist daran irgendetwas komisch oder unverständlich?“). Dem schloss sich die Aufforderung zur Paraphrasierung (z.B. „Kannst du bitte in eigenen Worten zusammenfassen, . . .?“) an, in Anlehnung an [34]. Die bei der Paraphrasierung auftretenden Veränderungen oder Auslassungen sind wichtige Indizien dafür, bis zu welchem Grad die Vorstellungen der Befragten einen Konstruktionsprozess der intendierten Konzepte bei den Lernenden zulassen [71].

Um eine Vergleichbarkeit zwischen den Akzeptanzbefragungen mit unterschiedlichen Schülerinnen und Schülern bestmöglich gewährleisten zu können, wurde ein Protokoll vorbereitet, welches im Anhang B dieser Arbeit eingesehen werden kann. Dieses enthält neben einer Einleitung (Begrüßung, Hinweis auf Anonymität, Erläuterung des Ablaufs, etc.) sämtliche im Lauf der sieben Themenblöcke dargestellten Erklärungen. Damit kann sichergestellt werden, dass Unterschiede in der Akzeptanz der Schülerinnen und Schüler nicht auf unterschiedliche Erklärungsansätze, unterschiedliche inhaltliche Reihung oder andere nicht intendierte Gründe zurückzuführen ist.

3.3 Kodierleitfäden

3.3.1 Kodierleitfaden zur Akzeptanz

Akzeptanzstufen: Die Auswertung der Akzeptanzbefragung erfolgte in Anlehnung an [34, 227, 71] nach dem Schema der skalierenden Inhaltsanalyse [134, S. 102]. Mit Hilfe eines ordinalskalierten Kategoriensystems, wurden die Schülerantworten auf einer 3-stufigen Skala kodiert. Es wurde für jede Key-Idea nach [34] zwischen vollständiger, eingeschränkter und keiner Akzeptanz unterschieden:

1. Vollständige Akzeptanz: Die Erklärung wird vom Lernenden ohne Einschränkung akzeptiert (Kodiert mit Zahlenwert 0).
2. Eingeschränkte Akzeptanz: Der Lernende äußert an einzelnen Aspekten der Erklärungen Kritik. Trotzdem wird diese grundsätzlich akzeptiert (Kodiert mit Zahlenwert 0,5).
3. Keine Akzeptanz: Die Erklärung wird vom Lernenden als zu schwer erachtet oder nicht verstanden (Kodiert mit Zahlenwert 1).

Wir wollen von der Akzeptanz der Lernenden bezüglich der Erklärungen einer Key-Idea ausgehen, wenn der mittlere Akzeptanzgrad kleiner als 0.5 ist. Die Kodierung wurde von unabhängigen Beurteilern vorgenommen und die hohe Übereinstimmung zwischen den beiden Ratern wird durch Cohens-Kappa ausgedrückt durch $\kappa = 0.95$ (95% CI [0.87; 1.00]).



Cohens-Kappa als Maß der Beurteilerübereinstimmung kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Bei κ werden anders als etwa bei der prozentualen Übereinstimmung auch zufällige Übereinstimmungen mit in die Berechnung einbezogen. Cohens Kappa ist daher das verbreitete Übereinstimmungsmaß. Werte für Cohens-Kappa von $\kappa \geq 0.8$ werden nach [118] als *almost perfect* bezeichnet, Werte ab 0.6 als substantiell.

Ankerbeispiele für die Kodierung: Die nachfolgenden Ankerbeispiele vermitteln einen Einblick in die Kodierung:

1. Vollständige Akzeptanz

- I: Wie findest du diese bisherige Erklärung der Naturwissenschaftler, was die Feinjustage des Experiments angeht? Findest du irgendetwas daran seltsam?
- P: Eigentlich war es gut erklärt und auch schlüssig. Von dem am Schluss, mit dem, dass man sich vergewissert, dass das, was man auch möchte auf den Detektor trifft, war es auch sehr schlüssig. Also, dass man gesehen hat, dass es nicht dieser mittlere Strahl ist, indem man den dann abdeckt. Das ist wichtig, dass keine Verwirrung entsteht. Also war schlüssig würde ich sagen.
- I: War noch irgendetwas besonders hilfreich beim Verständnis oder vielleicht verwirrend?
- P: Ja also auf jeden Fall, dass man sich das hier näher anschauen und dran rumdrehen kann, weil man dann auch ein Gefühl dafür bekommt, was man eben damit macht, wenn man mal was verstellt, also dass Raten höher oder kleiner werden. Dass man auch mal sieht, was das für eine Millimeterarbeit ist.
-

2. Eingeschränkte Akzeptanz

- I: Wie findest du diese bisherige Erklärung der Naturwissenschaftler, was den BBO-Kristall angeht? Ist für dich irgendetwas daran komisch oder unverständlich?
- P: Hm, also, eventuell das mit diesem Photonen präparieren, ist eventuell ein bisschen unverständlich. Aber zur Vorstellung ist es eigentlich ganz gut, wenn man das so sagt, denn dann weiß man eben, wenn der BBO-Kristall angeregt wird, dass eben bei jeder Anregung sozusagen 2 Photonen präpariert werden, also entstehen. Und aufgrund von Energie- und Impulserhaltung und den Eigenschaften des Kristalls...
-

3. Keine Akzeptanz

- I: Wie findest du diese bisherige Erklärung der Naturwissenschaftler, was den bisherigen Aufbau und die Notwendigkeit der Spiegel, der Blenden und der Fluoreszenzscheibe angeht? Ist für dich irgendetwas daran komisch oder unverständlich?
- P: Also zunächst mal habe ich die Umlenkspiegel nicht so richtig verstanden. Wozu werden die jetzt nochmal verwendet? Die anderen Sachen habe ich aber verstanden, glaube ich, vor allem das mit den Blenden. Die legen ja die Gerade fest.
-

3.3.2 Kodierleitfaden zur Paraphrasierung

Genau wie im Fall der Akzeptanzbefragung wurden auch die Paraphrasierungen der Schülerinnen und Schüler auf einer dreistufigen Skala kodiert, wobei die Kategorien dabei nach [34] wie folgt definiert wurden:

1. Gelungene Paraphrasierung: Inhaltlich korrekte Paraphrasierung ohne, dass alle Fachbegriffe vollständig richtig verwendet werden müssen (Kodiert mit Zahlenwert 0).
2. Befriedigende Paraphrasierung: Die zuvor gegebene Erklärung wird überwiegend richtig zusammengefasst. Einzelne Aspekte sind inhaltlich falsch oder unvollständig (Kodiert mit Zahlenwert 0,5).
3. Mangelhafte Paraphrasierung: Die Paraphrasierung ist größtenteils falsch oder eine eigenständige Zusammenfassung war nicht möglich (Kodiert mit Zahlenwert 1).

Der Beurteilung einer Schülerparaphrasierung als gelungen, befriedigend oder mangelhaft wurde anhand eines Erwartungshorizonts vorgenommen, in dem für alle Key-Ideas die zentralen Inhalte fixiert sind. Als Hilfe dienten dabei Kodierregeln.

Erwartungshorizont: Im Erwartungshorizont sind die wichtigsten Ideen festgeschrieben, die in der Paraphrasierung der Lernenden zu den jeweiligen Key-Ideas erwartet werden können.

1. Bestandteile quantenoptischer Experimente
 - (a) Spiegel zum Umlenken des Laserstrahls und zur exakten Ausrichtung des Laserstrahls mittels Justageschrauben.
 - (b) Mittels Blenden wird der Laser entlang einer Gerade ausgerichtet.
 - (c) Der Laser ist auf den BBO-Kristall gerichtet.
2. Der BBO-Kristall
 - (a) Beleuchten von BBO-Kristall mit blauem Laser führt auf Emission von Zwillingsphotonen.
 - (b) Fluoreszenzlicht hat doppelte Wellenlänge, wie einfallendes Licht (Energieerhaltung).
 - (c) Intensität des Fluoreszenzlichts ist sehr schwach und nicht mit bloßem Auge erkennbar.
3. Detektion von Licht: Beobachter statt Empfänger
 - (a) Detektoren werden mit Gleichspannung versorgt.
 - (b) Erläuterung der Funktionsweise in Analogie zu Schneelawinen.
 - (c) Dunkelzählrate: Detektor klickt auch ohne Beleuchtung.
4. Feinjustage quantenoptischer Experimente

- (a) Abstände beim Aufbau aus der Abbildungsgleichung und unter Beachtung des Emissionswinkels von 3° .
 - (b) Feinjustage mittels Justageschrauben zur Verschiebung der Linse innerhalb des Tubus in x- bzw. y-Richtung.
5. Der Koinzidenzbegriff: Präparation von Quantenzuständen
- (a) Koinzidenz = gleichzeitiges Eintreten eines Ereignisses an zwei oder mehr Detektoren.
 - (b) Koinzidenzen dienen der Präparation von Quantenzuständen.
6. Einzelne Photonen am Strahlteilerwürfel
- (a) Strahlteiler auf einer Seite des Koinzidenzexperimentes einbringen.
 - (b) Dritter Detektor am freien Ausgang des Strahlteilers hinzufügen.
 - (c) Beobachtet wird eine Halbierung der Koinzidenzraten bei den Detektoren an den Ausgängen des Strahlteilers mit dem Trigger; dies alleine ist aber noch kein Nachweis für die Unteilbarkeit des Photons.
7. Der Antikorrelationsfaktor: Antikorrelation am Strahlteilerwürfel
- (a) Zusammenhang zwischen der Zählrate und der Detektionswahrscheinlichkeit ist bekannt.
 - (b) Ideen bei der Ableitung des α -Faktors kann in Grundzügen wiedergegeben werden.
 - (c) Messung von $\alpha = 0$ bedeutet, dass keine Triplekoinzidenzen vorliegen und dies ist der Nachweis für die Unteilbarkeit des Photons am Strahlteiler.

Kodierregeln: Zur Kodierung mit Hilfe des oben dargestellten Erwartungshorizonts wurden die folgenden Kodierregeln genutzt.

1. Gelungene Paraphrasierung: für die jeweilige Key-Idea werden mindestens die im Erwartungshorizont festgeschriebenen Kerninhalte in die Paraphrasierung inhaltlich richtig einbezogen.
2. Befriedigende Paraphrasierung: für die jeweilige Key-Idea wird mindestens die Hälfte der im Erwartungshorizont festgeschriebenen Kerninhalte in die Paraphrasierung inhaltlich richtig mit einbezogen.
3. Mangelhafte Paraphrasierung: für die jeweilige Key-Idea wurden weniger als die Hälfte der im Erwartungshorizont festgeschriebenen Kerninhalte in die Paraphrasierung mit einbezogen oder sie wurden inhaltlich falsch verwendet.

Wir wollen die Paraphrasierungen zu den Erklärungen einer Key-Idea der Lernenden als gelungen bezeichnen, wenn der mittlere Wert der Paraphrasierungsqualität kleiner

3.3. KODIERLEITFÄDEN

als 0.5 ist. Die Kodierung wurde von unabhängigen Beurteilern vorgenommen und die Interrater-Reliabilität liegt bei $\kappa = 0.81$ (95% CI [0.69;0.93]).

Ankerbeispiele für die Kodierung: Die folgenden Ankerbeispiele vermitteln einen Eindruck in die Kategorisierung, die wiederum von zwei unabhängigen Kodierern vorgenommen wurde.

1. Gelungene Paraphrasierung

- I: Kannst du bitte in deinen eigenen Worten wiederholen, was Koinzidenz bedeutet und warum man Koinzidenzmessungen durchführt in der Quantenoptik?
- P: Also man hat das Problem, dass man sehr mit einem Rauschen behaftet ist von den Detektoren. Und man hat hier sowieso schon eine Paarquelle, also da werden immer paarweise Photonen rauspräpariert. Und wenn man dann sagt, dass die natürlich gleichzeitig emittiert werden, dann können die auch gleichzeitig gefangen werden. Und wenn man so ein Event hat, dann nennt man das ein koinzidentes Ereignis. Also es passiert genau gleich-zeitig, und dann kann man sagen, dass es eben Einzelphotonen waren aus dem Kristall.
-

2. Befriedigende Paraphrasierung

- I: Kannst du bitte in deinen eigenen Worten wiederholen, wie man den ursprünglichen experimentellen Aufbau ändert, um das Verhalten einzelner Photonen am Strahlteiler zu untersuchen?
- P: Also man baut jetzt zu dem ursprünglichen Aufbau noch den Strahlteiler bei dem einen der ablenkten Strahlen hinein. Und in 90° zu dem Strahlteiler steht ein dritter Detektor. Und...
- I: Und wo genau, wenn du sagst im 90° -Winkel? Also der Strahlteiler hat ja...
- P: Am reflektierten Ausgang.
- I: Und was hat man dann beobachtet?
- P: Man hat beobachtet, dass die Zählraten von B und C genau halb so groß war, wie bei A.
- I: Und ist das jetzt schon ein Nachweis für die Unteilbarkeit?
- P: Mh.
-

3. Mangelhafte Paraphrasierung

- I: Kannst du bitte mit deinen eigenen Worten wiederholen, wie Naturwissenschaftler in solchen optischen Experimenten Spiegel und Blenden verwenden und warum hier der Fluoreszenzfilter verwendet wird?
- P: Genau, also die Spiegel verwendet man, um den Laser gut auszurichten, und ihn gut fokussieren zu können. Diese Fluoreszenzblende mit demselben Gestell wie vom Kristall eben, um den Laserstrahl überhaupt zu sehen und den Kristall zu treffen.
- I: Wie macht man das mit den Spiegeln genau und wofür hat man jetzt die Blenden gebraucht?
- P: Also bei den Spiegeln, da hat man zwei von diesen Stellschrauben, wo man die Spiegel eben verkippen kann in alle möglichen Richtungen. Und da war noch die Blende, da war es einfach so, dass man einen möglichst kleinen Spalt zu macht, damit der Laser durch dieses Fluoreszenzding geht auf einer Gerade.
-

3.4 Ergebnisse

In diesem Abschnitt berichten wir zunächst die Ergebnisse, getrennt für die Befragung nach Akzeptanz und die Paraphrasierung. Im Anschluss diskutieren wir diese Ergebnisse vor dem Hintergrund der Forschungsfragen und skizzieren Implikationen, die zu einer Weiterentwicklung des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik geführt haben.

3.4.1 Ergebnisse der Befragung nach Akzeptanz

Die nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht über die Ergebnisse der Akzeptanzbefragung. Gezeigt ist jeweils die Einordnung für jeden Proband bzw. jede Probandin (Zeilen) pro Key-Idea (Spalten) und zwar farblich kodiert. Häufen sich in der Spalte einer Key-Idea gelbe oder rote Zellen (mittlere oder keine Akzeptanz), so spricht dies dafür, dass die jeweilige Elementarisierung im Grundsatz zu hinterfragen wäre. Um genauere Aussagen über die durchschnittliche Akzeptanz jeder Key-Idea treffen zu können, wurden Mittelwerte gebildet, die in der letzten Zeile eingetragen sind. In der letzten Spalte sind die Probandenmittelwerte eingetragen. Für jeden Schüler bzw. jede Schülerin wurde zusätzlich der Mittelwert der letzten beiden Zeugnisnoten im Fach Physik dokumentiert ($m = 2.04$, $SD = 1.03$). Ein tendenzieller Zusammenhang zwischen dem durchschnittlichen Akzeptanzgrad der Schülerinnen und Schüler sowie dem externen Kriterium Physiknote wird durch eine signifikant von Null verschiedene Korrelation von $r = 0.55$ ($p = 0.026 < 0.05$) angezeigt: eine bessere Durchschnittsnote im Fach Physik geht tendenziell mit einer positiveren Beurteilung der Probandinnen und Probanden zur Verständlichkeit der einzelnen Kapitel einher.

3.4. ERGEBNISSE

| Code | Ak1 | Ak2 | Ak3 | Ak4 | Ak5 | Ak6 | Ak7 | Ak-Mittel |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|-----------|
| ANWO | 0 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0,5 | 0,29 |
| BARA | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 |
| BIST | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 |
| CLMA | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,07 |
| GESI | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,14 |
| MAHE | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 |
| PEPE | 0 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,07 |
| SAKO | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 |
| SICH | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,5 | 1 | 0,5 | 0,29 |
| SIGE | 0 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,07 |
| SOWO | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 |
| SUAM | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,5 | 0 | 0,07 |
| DAJE | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,07 |
| Mittelwerte | 0,15 | 0,12 | 0,00 | 0,00 | 0,04 | 0,19 | 0,08 | |

Tabelle 3.1: Tabelle zu Ergebnissen der Befragung nach Akzeptanz. Der Fokus lag auf den Key-Ideas 3 (Detektoren), 5 (Koinzidenzmessung) und 7 (Antikorrelationsfaktor). Die Mittelwerte des Akzeptanzgrades liegen für alle Key-Ideas unterhalb des Cut-off-Werts von 0.5. Abbildung bereits publiziert in [14].

Die Akzeptanzbefragung zeigt zunächst, dass die erarbeiteten Elementarisierungen der Grundlagen quantenoptischer Realexperimente von den Schülerinnen und Schülern überwiegend als einleuchtend empfunden werden. Volle Akzeptanz zeigte sich insbesondere bei den Key-Ideas zu technischen Aspekten der Experimente, nämlich der Key-Idea *Detektion von Licht* (Ak3) und *Feinjustage* (Ak4). Alle Befragten äußerten sich (sehr) positiv zur Erläuterung der grundlegenden Funktionsweise der Einzelphotonendetektoren in Analogie zum Entstehen und Abgehen einer Schneelawine. Insbesondere die Tatsache, dass der Detektor auch grundlos klickt, es also sogenannte Dunkelzählereignisse gibt, wurde von den Befragten dabei durchweg verstanden und akzeptiert, z.B. sagt PEPE:

PEPE: „*Ich fand die Analogie gut, mit diesen Schneelawinen, weil es was ist was jeder kennt oder zumindest jeder eine gute Vorstellung davon hat wie so etwas abläuft und es passt in fast allen Punkten zu so einem Detektor, also man kann alle Punkte zu so einem Detektor in Verbindung bringen, was auch wichtig ist, denn wenn es Widersprüche gibt, wäre das auch blöd. Insofern war das ziemlich gut und hat auch die Eigenschaften des Detektors ziemlich gut erklärt.*“

Auch die Erklärungen zum Koinzidenzbegriff und zur Koinzidenzmethode (Ak 5) wurde von 12 der 13 befragten Schülerinnen und Schüler vollständig akzeptiert: die vorgetragenen Erläuterungen stützten sich auf das in Kapitel 2 bereits vorgestellte Arbeitsblatt, das die Klicks zweier Detektoren aufgetragen gegen eine Zeitachse zeigt. Die Schülerinnen und Schüler empfanden diesen Koinzidenzzettel durchweg als hilfreich für das Verständnis der Koinzidenzmessung:

SUAM: „*Also klar wurde, dass Koinzidenz eben diese Gleichzeitigkeit ist, dass beide Detektoren gleichzeitig [klicken] (..) Also bei dem Muster hat*

man halt dieses Zufällige sehr gut gesehen und dass halt nur ab und zu mal wirklich beide gleichzeitig da waren.“

Nur eine Schülerin (SIGE) äußerte sich kritisch zu dem Arbeitsblatt, empfindet die Erläuterungen dazu aber ebenfalls als logisch:

SIGE: „Also, ich fand es jetzt erstmal so, dass wenn man den Zettel sieht, (...) dann komm ich jetzt erstmal nicht drauf, dass das [die Koinzidenzen] so die entscheidenden Sachen sind (...). Das wurde mir gesagt und dann ist es auf jeden Fall auch logisch.“

Die Akzeptanzwerte für das Kapitel zum Laser, den Umlenkspiegeln und der Blenden (Ak 1), sowie für das Kapitel zum BBO-Kristall (Ak 2) liegen mit 0.15 bzw. 0.12 zwar immer noch im positiven Akzeptanzbereich; dennoch gab es einige Schülerinnen und Schüler, die keine vollständige Akzeptanz der gegebenen Erklärung zeigten. Bei den Erklärungen zum BBO-Kristall waren es zwei unterschiedliche Gründe, die nicht auf volle Akzeptanz führten: Zum einen war die Tatsache, dass die Wellenlänge der emittierten Photonen doppelt so groß ist, wie die des einfallenden Laserlichts nicht für alle Lernenden unmittelbar einleuchtend. Als ein wichtigerer Punkt bei der Erklärung der parametrischen Abwärtskonversion wird aber der von ANWO angesehen:

ANWO: „Ich behaupte das Sprechen von Photonen impliziert, dass man von Teilchen spricht.“

In der Tat spricht ANWO hier nämlich einen kritischen Punkt an: Obwohl wir im Konzept die Präparation von Einzelphotonen durch Koinzidenzmessung betonen wollen, sprechen wir bei der Erläuterung der parametrischen Abwärtskonversion im BBO-Kristall von einfallenden Photonen und erzeugten Photonenpaaren (vgl. Kapitel 2). Es ist ganz richtig, dass hiermit eine Teilchenvorstellung quasi schon impliziert wird. ANWO hat diesen kritischen Punkt erkannt.



Das ist eigentlich ein großer Erfolg, weil ANWO offensichtlich viel verstanden haben muss, um diesen kritischen Punkt zu erkennen. Die Unterrichtspraxis zeigt: Wenn die Koinzidenzmessung behandelt wurde, hinterfragen viele der Lernenden rückblickend die Erklärungen zum BBO-Kristall. Meist am Ende des Unterrichtskonzepts wird diese Frage noch einmal aufgegriffen. Den Lernenden ist dann klar, dass es erst im Moment einer Koinzidenz Sinn macht, von einem Photon zu reden. Diese Stelle unterstreicht noch einmal die bereits in Kapitel 2.4 erläuterte Bedeutung theoriegeleiteter Experimente in der Quantenphysik.

Keine Akzeptanz lag bei dem Kapitel *Einzelne Photonen am Strahlteiler* (Ak 6) bei zwei Befragten vor. Während ANWO bemängelte, dass man „das was gezeigt werden soll, besser ankündigen muss“, war SICH mit der großen Menge an Fachwörtern und Eindrücken überfordert. Grundsätzlich ist dieses Kapitel tatsächlich anspruchsvoll gewesen, denn es wurde zunächst am Beispiel des Michelson-Interferometers mit klassischem Licht an Strahlteiler und Interferenz erinnert und dann der Übertrag gemacht zu Einzelphotonenexperimenten und dem Verhalten einzelner Photonen am Strahlteiler. Die Akzeptanz

3.4. ERGEBNISSE

der anderen Befragten war aber dennoch gut und insbesondere verstand etwa GESI sehr genau die Verknüpfung zur nächsten Key-Idea:

GESI: *„Ich fand die Erklärung sehr verständlich, was ich auch sehr gut fand ist, dass zunächst mal die, mir schon bekannte, Interferenz mit normalem klassischem Licht gezeigt wurde. (...) Es wurde nochmal dann am PC veranschaulicht und Hypothesen aufgestellt, die wir dann im nächsten Schritt überprüfen wollen.“*

Mit dem nächsten Schritt meint GESI übrigens die sich daran anschließende Korrelationsanalyse zwischen den beiden Ausgängen des halbdurchlässigen Spiegels zur Überprüfung der Hypothese „Photonen sind unteilbar“. Die Ableitung zum *Antikorrelationsfaktor* (Ak 7) führt bei den Schülerinnen und Schülern durchweg auf hohe Akzeptanz. ANWO zeigte zwar nur mittlere Akzeptanz, fand aber die „ α -Herleitung sehr gut nachvollziehbar“. Problematisch war bei ANWO, als auch bei SICH, lediglich die Anwendung einfacher Prozentrechnung im Kontext des Experiments:

ANWO: *„Bis ich verstanden habe, dass Zahl der Ereignisse [die Zahl der Experimente wird durch die Zahl der Klicks pro Zeiteinheit beim Triggerdetektor bestimmt], die Ereignisse bei B sind hat bisschen gedauert und das Beispiel fand ich wenig hilfreich, da hast du gesagt, von wegen wenn wir 10000 Ereignisse haben mit Detektionswahrscheinlichkeit so und so... ich würde als Beispiel einfach Detektor A nehmen, das reicht. Ansonsten α -Herleitung fand ich sehr gut nachvollziehbar.“*

Andere Lernende, BIST etwa, betonten sogar den Einbezug elementarer Wahrscheinlichkeitsrechnung:

BIST: *„Also ich find es gut, dass die Stochastik jetzt noch ein bisschen mit reinspielt und es war wieder anschaulich erklärt auch jetzt am Ende vor allem, dass man kurz gesehen hat, dass es tatsächlich Null ist. Und ansonsten war die Erklärung halt formal, aber gut. (.) An manchen Stellen bisschen schnell.“*

Der Akzeptanzgrad von 0.08 weist im Rahmen der (geringen) Verallgemeinerbarkeit einer qualitativen Erhebung von $N = 13$ Probandinnen und Probanden darauf hin, dass eine didaktische Rekonstruktion des Antikorrelationsfaktors, wie hier vorgeschlagen, möglich ist.

3.4.2 Ergebnisse der Paraphrasierung

Genauere Informationen über den möglichen Einfluss auf den Lernerfolg der präsentierten Elementarisierungen lieferte die Paraphrasierung. Dabei wurden die Schülerinnen und Schüler gebeten, die zuvor erhaltene Erklärung in eigenen Worten wiederzugeben. Die nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht über die Bewertungen der Paraphrasierungen der verschiedenen Erklärungen durch die befragten Schülerinnen und Schüler. Gezeigt ist jeweils die Einordnung für jeden Proband bzw. jede Probandin (Zeilen) pro Key-Idea (Spalten).

| Code | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P-Mittel |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|----------|
| ANWO | 0 | 0,5 | 0 | 0,5 | 0 | 0,5 | 1 | 0,36 |
| BARA | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,5 | 0 | 0 | 0,07 |
| BIST | 0 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0 | 0 | 1 | 0,36 |
| CLMA | 0 | 0 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0 | 0 | 0,21 |
| GESI | 0,5 | 0 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0,5 | 0,21 |
| MAHE | 0 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0,5 | 1 | 0,29 |
| PEPE | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,07 |
| SAKO | 0,5 | 1 | 0,5 | 0 | 0,5 | 0 | 0,5 | 0,43 |
| SICH | 0 | 0 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1 | 0,5 | 0,43 |
| SIGE | 1 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,5 | 0,29 |
| SOWO | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,5 | 0 | 0,07 |
| SUAM | 0 | 0,5 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0,5 | 0,21 |
| DAJE | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,5 | 0,5 | 0,21 |
| Mittelwerte | 0,23 | 0,27 | 0,23 | 0,15 | 0,15 | 0,23 | 0,46 | |

Tabelle 3.2: Tabelle zu Ergebnissen der Paraphrasierungen. Der Fokus lag auf den Key-Ideas 3 (Detektoren), 5 (Koinzidenzmessung) und 7 (Antikorrelationsfaktor). Die Mittelwerte für die Qualität der Paraphrasierungen liegen für alle Key-Ideas unterhalb des Cut-off-Werts von 0.5. Abbildung bereits publiziert in [14].

Es fällt unmittelbar auf, dass wieder alle Mittelwerte im guten Bereich (< 0.5) liegen und somit überwiegend eine Paraphrasierung möglich war. Keine der Key-Ideas sticht im besonderen Maße hervor im Hinblick auf besondere Schwierigkeiten. Ein tendenzieller Zusammenhang zwischen der durchschnittlichen Qualität der Paraphrasierung der Schülerinnen und Schüler und dem externen Kriterium Physiknote wird durch eine mittlere Korrelation von $r = 0.63$ ($p = 0.011 < 0.050$) angezeigt: eine bessere Durchschnittsnote im Fach Physik geht tendenziell mit einer besseren Paraphrasierung der Probandinnen und Probanden einher. Im Folgenden werden die aufgetretenen Probleme der Schülerinnen und Schüler zu den einzelnen Key-Ideas genauer erläutert: Die Key-Idea Bestandteile quantenoptischer Experimente (P 1) bereitete den meisten Schülerinnen und Schülern keine großen Probleme. Vielen Lernenden gelangen umfassende Erläuterungen zu den experimentellen Komponenten, wie beispielsweise CLMA:

CLMA: „Die Spiegel werden benutzt damit man den Laser richtig ausrichten kann und die Blenden, damit der Laser auch wirklich in einer Geraden verläuft, also den Pfad nimmt, den man will, dass er nimmt. Und der Fluoreszenzschirm war dafür da, dass ich sehen kann wie mittig der Laser ist, damit ich ihn genau Ausrichten kann, weil er später den Kristall möglichst mittig treffen muss. [...]“

Zur Key-Idea BBO-Kristall (P 2) zeigten sich bei der Paraphrasierung keine nennenswerten Lernhürden, die in direkter Verbindung mit dem Konzept stehen. Die Einschränkung der Qualität der Paraphrasierungen ergab sich vor allem dadurch, dass dem Kristall ein aktives Handeln zugewiesen wurde, wie etwa bei SAKO beobachtet:

SAKO: „Der Kristall wird vom Laser beschossen, der Kristall ist nur als Photonen-Quelle da. Der Kristall, der teilt die Photonen, also er teilt den Strahl in zwei Richtungen [...]“

3.4. ERGEBNISSE

Allerdings wurden die Energie- und Impulserhaltung fast durchweg genannt und auch fachlich richtig erläutert.

Dass die Erklärungen zur Funktionsweise der Detektoren (P 3), zur Feinjustage (P 4) und zur Koinzidenzmessung (P 5) bei den Schülerinnen und Schülern gut ankamen, bestätigt neben den niedrigen Akzeptanzwerten auch die hohe Qualität der vorgetragenen Paraphrasierungen (Mittelwert 0.23 für P 3 bzw. 0.15 für P 4 und P 5).

Die Funktionsweise der Detektoren erläutert BARA beispielsweise umfassend so und ist damit keinesfalls ein Einzelfall:

BARA: „Ja also die Detektoren sind an eine Spannung angeschlossen und erzeugen dann eben ne Hochspannung und funktionieren eigentlich damit, dass sie Ladungen auf ein sehr hohes Potential heben, bei dem es dann eben ausreicht, wenn man eine recht kleine Menge an zusätzlicher Energie einfallen hat, dass die eben von dem Potential runter können und dann (.) diesen Energiestoß auslösen (.) der dann vom Computer registriert werden kann. (..) „Muss man noch etwas zu den Detektoren wissen?“ Ja, die sind keine perfekten Geräte, also die Zahl, die dann angezeigt wird, ist nicht die tatsächliche Zahl an Photonen (.), die haben (.) so einen Fehler, der einfach dadurch passiert, dass dieses Fallen vom Potential ein gewisser statistischer Prozess ist, das heißt der kann auch zufällig passieren oder eben auch durch Einflüsse aus der Umgebung (.)“

Die Bedeutung der Koinzidenzmessung wird allen Schülerinnen und Schülern klar. Ein Beispiel liefert die folgende Aussage von SUAM:

SUAM: „Also Koinzidenz bedeutet, dass eben zwei Detektoren gleichzeitig ein Ereignis messen (.) Man benötigt es im Prinzip dafür, dass man sagen kann, das war jetzt wirklich ein Photon und nicht, dass wieder irgendein zufälliges Ereignis war. Das heißt, wenn man dann das Experiment durchführt, kann man dann durch diese Koinzidenzmessungen rausfiltern, welche Messwerte brauch ich und welche nicht.“

Natürlich haben manche der Befragten Schwierigkeiten damit, alle Fachbegriffe vollständig richtig zu nutzen, aber ein grundsätzliches Verständnis kann auch festgestellt werden, wenn die Paraphrasierung nur mittlere Qualität hatte, etwa bei BIST. Hier werden zwar gewisse Präkonzepte erkennbar - insbesondere ist ein großer Einfluss mechanistischer Sprache feststellbar - aber das Konzept der Koinzidenzmessung wurde verstanden:

BIST: „Also man hat das Problem, dass man sehr von einem Rauschen behaftet ist bei den Detektoren. (.) Und man hat jetzt sowieso schon ne Paarquelle, also da werden immer Paarweise Photonen raus präpariert und wenn man dann sagt, dass die natürlich gleichzeitig emittiert werden, dann können die natürlich auch gleichzeitig gefangen werden und wenn man dann ein solches Event hat, dann nennt man das halt ein koinzidentes Ereignis. Also es passiert genau gleichzeitig und dann kann man sagen, dass das tatsächlich Einzelphotonen aus dem Kristall waren, die man da detektiert hat.“

Ein häufiges Problem bezogen auf den Koinzidenzbegriff war nur, dass viele Schülerinnen und Schüler lediglich den Spezialfall von Koinzidenzen zwischen zwei Detektoren diskutierten, der Übertrag auf drei oder mehr aber nicht immer von alleine bedacht wurde.

Dass die Mittelwerte für die Qualität der Paraphrasierungen bei den Key-Ideas *Einzelne Photonen am Strahlteiler* (P 6) und zum *Antikorrelationsfaktor* (P 7) mit 0.23 bzw. 0.46 etwas höher liegt, überrascht nicht. Hier ist nämlich die Zahl der zu kennenden Fachbegriffe für eine vollständige Paraphrasierung recht hoch und es gab zuvor bereits eine große Menge neuer Eindrücke. Teilweise konnten Lernende - etwa ANWO - zwar die Herleitung nicht mehr in eigenen Worten wiedergeben, aber die Bedeutung des Antikorrelationsfaktors wurde dennoch verstanden:

ANWO: „Also über die Koinzidenz weiß man, dass zeitgleich ein Einzel-Photon Experiment beim Strahlteiler passiert. Stochastische Unabhängigkeit der Counts und die Formel haben wir so umgestellt, dass wir ein Alpha bekommen, dass eins sein muss, wenn sie korreliert sind, aber das Alpha ist fast immer Null, (.) was uns dazu führt, dass N_{ABC} eben null sein muss, was uns zu dem Schluss führt, dass es keine Triplekoinzidenzen gibt. Und damit ist experimentell gezeigt, dass ein Photon unteilbar sein muss. [I: „Und was haben wir in Zusammenhang gesetzt?“] Die Zählrate bei Detektor A und die Detektionswahrscheinlichkeit.“

Insgesamt liegen die Werte für beide Key-Ideas aber noch im positiven bis mittleren Bereich. Ein Beispiel für eine sehr umfassende Paraphrasierung zum Antikorrelationsfaktor ist die von PEPE:

PEPE: „Die Annahme war, dass diese Detektoren unabhängig voneinander Ereignisse aufnehmen und dass sozusagen die Wahrscheinlichkeiten stochastisch unabhängig sind, dass in A und in B und in allen dreien ein Ereignis eintritt. Das waren so die Grundüberlegungen worauf wir dann diese Rechnung basiert haben und dann haben wir über die Wahrscheinlichkeiten gesprochen, dass in irgendeinem Detektor ein Ereignis eintritt, das ist immer abhängig von der Zählrate in A. Zum Beispiel die Zählrate in B ist die Zählrate in A mal irgendeine Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Ereignis in B eintritt und in C, eben das gleiche, und daraus haben wir die Rechnung angestellt, indem wir die stochastische Unabhängigkeit ausgenutzt haben. Dann haben wir noch einfließen lassen, dass wir keine Wahrscheinlichkeiten messen können, sondern nur Ereignisse. Deswegen haben wir noch N_A reingebracht, weil wir das messen können. Dann haben wir die Gleichung umgestellt, sodass ein konkreter Wert rauskommt. Und dann haben wir uns überlegt, was es heißt, wenn da ein Wert rauskommt. Wenn ein Wert ungleich Null rauskommt, dann ist der Zähler größer als Null, bzw. ungleich Null. Und wenn ein Wert gleich Null rauskommt, dann muss der Zähler auch gleich Null sein. Und das würde heißen, dass das Alpha gleich Null ist und so keine Triplekoinzidenzen eintreten.“

Gemeinsam mit den guten Akzeptanzwerten liefert dies zumindest ein Argument für die Möglichkeit mit Schülerinnen und Schülern theoriegeleitete Experimente zur Quan-

tenoptik durchzuführen und den Antikorrelationsfaktor in der gymnasialen Oberstufe argumentativ einzusetzen.

3.5 Diskussion der Ergebnisse und Implikationen

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Akzeptanzbefragungen im Bezug auf die Forschungsfragen zusammengefasst dargestellt und Änderungen am Konzept, die vor dem Hintergrund dieser Ergebnisse vorgenommen wurden, werden kurz umrissen.

3.5.1 Forschungsfrage 1: Erste Wirkung quantenoptischer Realexperimente auf Lernende

Neun der 13 Befragten fanden die Experimente auf den ersten Blick interessant, spannend oder begeisternd¹ und drei der Befragten empfanden das Experiment als seltsam. Insbesondere die Frage danach, was vom Experiment die Schülerinnen und Schüler zuerst ins Auge fassten, zeigte ein interessantes Ergebnis: Die große Mehrheit der Befragten nannte dabei die Detektoren, wobei drei Probanden deren Größe als Argument nannten. Keiner der Schülerinnen und Schüler nannte die Spiegel oder gar den PDC-Kristall. Dass die Detektoren von so vielen Schülerinnen und Schülern zunächst betrachtet werden, spricht dafür, die Detektoren nicht nur als Hilfsmittel, sondern als gleichberechtigte Komponente der quantenoptischen Realexperimente ins Zentrum der Unterrichtseinheit zu stellen. Dies ergibt auch aus fachlicher Sicht Sinn (vgl. Kapitel 2).

3.5.2 Forschungsfrage 2: Funktionsweise von Einzelphotonendetektoren

Das Kapitel zur Funktionsweise von Einzelphotonendetektoren wurde von den Schülerinnen und Schülern sehr gut verstanden. Dies belegen eine mittlere Akzeptanz von 0.00 und die mittlere Qualität der Paraphrasierungen von 0.23. Die Schneelawinenanalogie wird von allen Befragten als sehr hilfreich beschrieben, insbesondere zur Verdeutlichung der Bedeutung von Dunkelzählereignissen gerade auch für die Experimente.

3.5.3 Forschungsfrage 3: Koinzidenzbegriff

Die Key-Idea *Der Koinzidenzbegriff* wurde von den Schülerinnen und Schülern sehr gut akzeptiert. Dies belegen eine mittlere Akzeptanz von 0.04 und die mittlere Qualität der Paraphrasierungen von 0.15. Die Hinleitung zum Koinzidenzbegriff mittels des Koinzidenzzettels wurde von den Probandinnen und Probanden als hilfreich empfunden, im Besonderen auch die Tatsache, dass sie zunächst eigene Beobachtungen machen und äußern konnten. Dass die Befragten auch verstanden haben, weshalb Koinzidenzmessungen Grundlage von Einzelphotonenexperimenten sind, zeigt sich insbesondere an der hohen Qualität der vorgetragenen Paraphrasierungen.

¹Dies sind auch genau die Begriffe, die die Lernenden in ihren Beschreibungen wählten.

3.5.4 Forschungsfrage 4: Antikorrelationsfaktor

Der Behandlung von einzelnen Photonen am Strahlteiler (Ak 6) konnten einzelne Lernende aufgrund der großen Vielzahl an neuen Fachbegriffen nur schwer folgen. Zwar sind die einzelnen Erklärungsansätze auf Grundlage dieser Akzeptanzbefragung als potentiell erfolgreich einzuschätzen, trotzdem soll dieser Schritt als Ergebnis dieser Befragung im Unterrichtskonzept zweigeteilt werden. In einem Schritt soll Licht am Strahlteiler und Interferenz diskutiert werden und erst in einem zweiten Schritt folgt die Untersuchung einzelner Photonen am Strahlteiler.

Die Key-Idea *Antikorrelationsfaktor* wurde von den Schülerinnen und Schülern gut akzeptiert. Dies belegen ein mittlerer Akzeptanzgrad von 0.08 und die mittlere Qualität der Paraphrasierungen von 0.46. Die Herleitung erfolgt unter der Annahme stochastisch unabhängiger, zufälliger Pulse und einem der Logik entspringenden Zusammenhang von Zählrate an den einzelnen Detektoren und der Zahl der gesamten Ereignisse über die Detektionswahrscheinlichkeit. Diese Ableitung in eigenen Worten wiederzugeben, ist eine hohe Anforderung und wurde dennoch von immerhin 77% der Schülerinnen und Schüler in zufriedenstellendem Maße gemeistert. Neben dieser inhaltlichen Argumentation ist auch festzuhalten, dass seitens der Schülerinnen und Schüler nach der formalen Herleitung bei der Argumentation mit dem Antikorrelationsfaktor an sich keine Hemmungen zu vernehmen waren.

3.5.5 Forschungsfrage 5: Lernschwierigkeiten

Obwohl alle durchschnittlichen Akzeptanzwerte in dieser Untersuchung deutlich unter 0.5 liegen und damit im guten Bereich sind, zeigten im Abschnitt über einzelne Photonen am Strahlteiler und im Interferometer (vgl. Tabelle 3.1, Ak6) zwei Probanden keine Akzeptanz. Die Akzeptanz der anderen Befragten war durchweg gut, es zeigte sich aber dennoch, dass besonders einzelne Lernende aufgrund der großen Informationsmenge an dieser Stelle Unbehagen entwickeln können. Als Ergebnis dieser Befragung wird dieses Thema daher im Unterrichtskonzept modifiziert, indem es zweigeteilt wird: Erst erfolgt die Einführung des Strahlteilerwürfels mit einem Experiment mit Laser, dann wird der Übertrag auf das Einzelphotonenexperiment vorgenommen (vgl. Abschnitt 3.5.4). Nachdem die Lernenden den Strahlteilerwürfel kennen gelernt haben, sollen sie eigenständig Vorschläge zur experimentellen Erweiterung des Konizidenzexperimentes entwickeln, so dass das Verhalten von einzelnen Photonen am Strahlteiler untersucht werden kann. Das entsprechende Arbeitsblatt in seiner finalen Version berücksichtigt diesen Zwischenschritt (vgl. Anhang A).

Der mittlere Wert der Qualität der Paraphrasierungen zum *BBO-Kristall* ist der zweithöchste (P2-Mittel: 0.27) und Lernende neigen zu einer Sender-Empfänger-Vorstellung. In der überarbeiteten Fassung der Unterrichtskonzepts wird daher die parametrische Abwärtskonversion auf die Konzepte der Energie- und Impulserhaltung reduziert - der Grund dafür ist, dass die Rolle des Kristalls als "Quelle" nicht zu stark zentriert werden sollte, um stattdessen die Detektoren und die Koinzidenzmethode im Zusammenhang mit der Präparation von Einzelphotonenzuständen hervorzuheben. So sollen mechanistische Sprechweisen noch stärker umgangen werden.

Die Lernenden entwickelten ein umfangreiches Verständnis für die Koinzidenzmessungen. Das Lehrkonzept muss jedoch auf die Verallgemeinerung des Koinzidenzkonzeptes auf mehr als zwei Detektoren, z.B. bei Dreifachkoinzidenzen, erweitert werden. Die Definition der Mehrheit der Lernenden in der Paraphrasierung umfasst nur den Spezialfall des gleichzeitigen Klickens von zwei Detektoren. Da die Anzahl der Dreifachkoinzidenzen für Antikorrelation am Strahlteiler als Quanteneffekt aber besonders wichtig ist, ist dies im Unterricht allgemeiner zu erklären.

Problematisch war für einzelne Lernende die Anwendung einfacher Prozentrechnung im Kontext des Experiments bei der Herleitung des Antikorrelationsfaktors. Um mögliche Lernschwierigkeiten dahingehend zu umgehen, wird folgende Änderung am Konzept vorgenommen: es werden zunächst die Zählraten und ihre Interpretation gemeinsam mit den Lernenden genauer diskutiert und eine einheitliche Notation wiederholt. Dafür wurde ein entsprechender Abschnitt auf der finalen Version des entsprechenden Arbeitsblatts eingerichtet (vgl. Anhang A).

3.6 Zusammenfassung der formativen Evaluation und Ausblick

Quantenoptische Realexperimente sind anspruchsvoll. Es scheint ein ambitioniertes Unterfangen, Lernenden der gymnasialen Oberstufe wesentliche Aspekte der Quantenoptik zu vermitteln. Eine wichtige Frage dabei ist, ob Lernenden die zugrundeliegenden Konzepte auf eine Weise vermittelt werden können, damit diese davon profitieren und dadurch in die Lage versetzt werden, Grundsätzliches über Quantenphysik von einer modernen Perspektive zu lernen.

Die in diesem Kapitel vorgestellte Untersuchung liefert erste empirische Argumente dafür, dass dies in der Tat potentiell möglich ist. Jedenfalls scheinen Lernende Geräten, wie Einzelphotonendetektoren, oder Messmethoden, wie der Koinzidenzmessung, gegenüber unvoreingenommen zu sein. Viele der vorgebrachten Zitate von Schülerinnen und Schülern belegen, dass die Lernenden diese Konzepte auf hohem Niveau verstehen können.

Das Erlanger Unterrichtskonzept wurde auf Grundlage der in dieser formativen Evaluation ausgemachten Lernhürden an einzelnen Stellen überarbeitet. In seiner - für den Moment - finalen Version, wurde es anschließend einer umfassenden summativen Evaluation unterzogen, um zu klären: Entwickeln die Lernenden, die mit dem Erlanger Konzept in die Quantenphysik eingeführt werden, ein umfassendes Wissen zu quantenoptischen Begriffen und können sie innerhalb dieses neuen begrifflichen Rahmens konsistent argumentieren? Gelangen die Lernenden auf diese Weise wirklich zu quantenphysikalisch geprägten Vorstellungen? Gelingt es verbreitete Schülervorstellungen zu umgehen?

Die Vorbereitung der Beantwortung dieser Fragen mittels einer summativen Evaluation wird im zweiten Teil dieser Arbeit berichtet. Dabei ist das Studiendesign mit den eingesetzten Methoden vorzustellen, genauso, wie das eingesetzte Instrumentarium.

Teil II

Vorbereitungen einer summativen Evaluation

KAPITEL 4

Anlage und Vorbereitungen einer Studie zur summativen Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik

„Spectacular achievement is always preceded by unspectacular preparation.“

- R. H. Schuller

Einordnung in den Kontext der Arbeit

In diesem Kapitel werden alle wesentlichen Informationen zur summativen Evaluation des in Kapitel 2 vorgestellten Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik bereitgestellt. Die in Kapitel 3 skizzierten Ergebnisse einer formativen Evaluation führten zu kleineren Änderungen am Konzept und legitimierten seinen Einsatz im Rahmen einer größer angelegten Studie an Schulen. Die Forschungsfragen und das Studiendesign werden in diesem Kapitel ebenso erläutert, wie die eingesetzten Erhebungsinstrumente. Zum Erheben affektiver Lernermerkmale konnte auf bereits pilotierte Skalen zurückgegriffen werden. Die Eigenentwicklung eines Fachwissens-tests „Quantenoptik“ wird mit Hilfe der Darstellung gängiger Testinstrumente begründet. In den Kapiteln 5 und 6 werden daran anschließend zwei Pilotstudien vorgestellt.

4.1 Forschungsfragen und Studiendesign

Mit der summativen Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik wird ein zentrales Ziel verfolgt: Es soll mit quantitativen Mitteln untersucht werden, inwiefern

4.1. FORSCHUNGSFRAGEN UND STUDIENDESIGN

Schülerinnen und Schüler der gymnasialen Oberstufe mittels des Erlanger Unterrichtskonzepts ein vernetztes Wissen zur modernen Quantenphysik erlangen können. Das Erlanger Unterrichtskonzept stellt dabei einen Repräsentanten dar für eine Reihe von Unterrichtskonzepten und Lernhilfen zur modernen Quantenphysik. Es soll untersucht werden, inwiefern ein begrifflicher Rahmen der sich von dem traditioneller Lehrgänge fundamental unterscheidet, dazu beitragen kann, dass Schülerinnen und Schüler adäquate Vorstellungen zur Quantenphysik hin zu den Wesenszügen aufbauen - welche nach Kapitel 1 als Ziel eines Quantenphysikunterrichts gelten können.

4.1.1 Forschungsfragen

Wir wollen an dieser Stelle die der Untersuchung zugrundeliegenden Forschungsfragen zum Überblick stellen.

FF 1: Erreichen die Lernenden durch das Unterrichtskonzept ein umfassendes Begriffswissen zur Quantenoptik?

FF 1a: Führt das Unterrichtskonzept zu einem angemessenen und sicheren deklarativen Wissen^a zur Quantenoptik?

FF 1b: Sind die Schülerinnen und Schüler in der Lage, mit den Begriffen der Quantenoptik zu argumentieren und Zusammenhänge herzustellen?

FF 2: Inwieweit gelangen die Schülerinnen und Schüler zu einem Verständnis der Wesenszüge „Statistische Vorhersagbarkeit“ und „Fähigkeit zur Interferenz“ nach Küblbeck und Müller [110]?

FF 3: Gelangen die Schülerinnen und Schüler zu quantenphysikalisch adäquaten Vorstellungen zur Eigenschaft Ort sowie zur Wahrscheinlichkeitsdeutung in der Quantenphysik?

FF 4: Ergibt sich für die Lernwirksamkeit des Konzepts eine Abhängigkeit von dem Geschlecht der Lernenden, dem fachspezifischen Prätestergebnis oder affektiven Lernendenmerkmalen?

FF 5: Wird das Konzept von den Lernenden als interessant empfunden und bewirkt das Unterrichtskonzept ein verstärktes Interesse an Physik oder am Experiment in der Physik?

FF 6: Wie wird das Erlanger Unterrichtskonzept von Lehrkräften aus der Praxis beurteilt hinsichtlich der inhaltlich-methodischen Strukturierung und der Praxistauglichkeit?

^aUnter dem Begriff „deklaratives Wissen“ soll hier das Wissen über Objekte, Inhalte oder Fakten nach Anderson [3] verstanden werden.

In Tabelle 4.1 wird dann auch die Operationalisierung dieser Forschungsfragen in der Übersicht klar. Zunächst wird aber ein Überblick über das Design und die Umsetzung der Studie gegeben.

4.1.2 Studiendesign

Mixed-Methods und Triangulation¹: Die Forschungsfragen 1 bis 5 beziehen sich direkt auf die Schülerperspektive, während Forschungsfrage 6 die Perspektive der Lehrenden adressiert. Diese ermöglicht in einem weiteren Zyklus das Re-Design des Unterrichtskonzepts auch aus der Praxisperspektive mit dem Ziel, nachhaltig Veränderungen im Unterricht der Quantenphysik zu initiieren. Eine solche Weiterentwicklung des Konzepts auf der Grundlage empirischer Befunde aus der Schülersicht erfordert notwendigerweise, dass die Lernergebnisse aus mehreren Perspektiven beleuchtet und die Lernprozesse aus unterschiedlichen Blickwinkeln beforscht werden. Dieser mehrperspektivische Blick auf die im Unterricht zur Quantenoptik mit dem Erlanger Konzept ablaufenden Lernprozesse erfolgt in der hier vorgelegten Studie daher mittels eines Mixed-Methods-Designs [186].

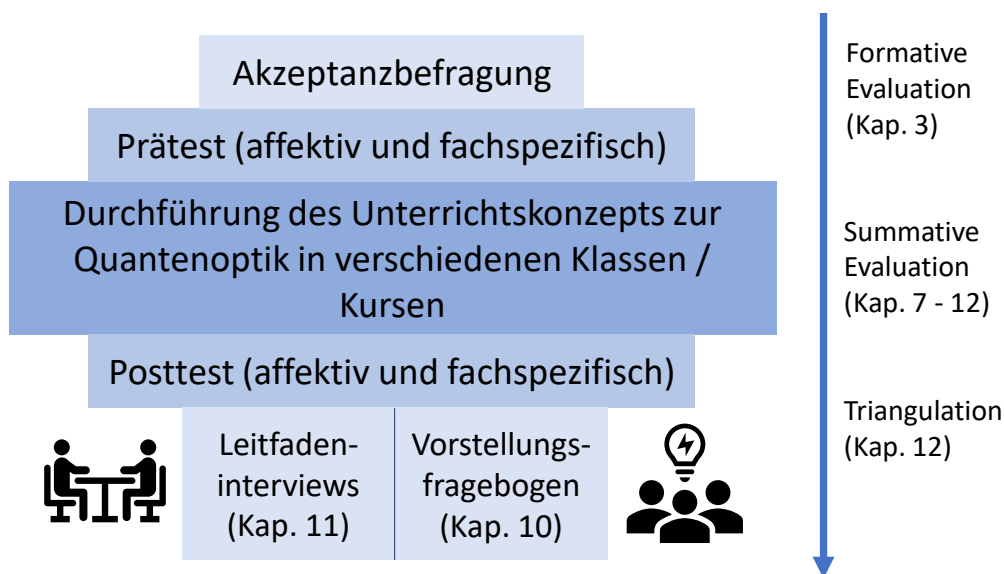


Abbildung 4.1: Die summative Evaluation erfolgt durch den Einsatz eines Testinstruments zum Begriffswissen im Prä-Posttest-Design unter Hinzunahme eines Vorstellungsbogens adaptiert nach Müller [143] im Posttest, sowie Leitfadeninterviews im Nachgang zur Intervention mit einer Zufallsstichprobe. Die Ergebnisse der formativen Evaluation wurden bereits in Kapitel 3 vorgestellt. Die Ergebnisse der summativen Evaluation folgen in Kapitel 7 - 12: In den Kapiteln 7 - 9 werden die Ergebnisse des Fachwissenstests „Quantenoptik“ und der Skalen zu affektiven Lernermerkmalen vorgestellt. Die Ergebnisse des Vorstellungsbogens (Kapitel 10) und der Leitfadeninterviews (Kapitel 11) werden zunächst isoliert berichtet. In Kapitel 12 folgt eine Triangulation [62] zwischen den Erhebungsmethoden und damit der Abschluss der summativen Evaluation. Abbildung bereits publiziert in [15].

¹Teile dieses Abschnitts sind bereits publiziert in [15].



Der Begriff der *Triangulation*. Die Triangulation ist ein in den Naturwissenschaften bekanntes Verfahren. Man denke beispielsweise an die Bestimmung der Abstände von Planeten unseres Sonnensystems zur Erde oder an die Funktionsweise von GPS [47, S. 263]. Bei beiden Verfahren steht die Festlegung eines Orts aus verschiedenen Perspektiven im Mittelpunkt. In der empirischen Forschung ist es genauso: die Beforschung eines Untersuchungsgegenstands aus unterschiedlichen Perspektiven führt letztlich zu einem solideren Forschungsergebnis [122, S. 287]. In einem Mixed-Methods Design, wie im Rahmen der Studie dieser Arbeit, wird die Triangulation durch die Verwendung verschiedener qualitativer und quantitativer Methoden realisiert, aber auch andere Formen der Triangulation wären denkbar, siehe dazu den Überblicksartikel von [62].

Explorativer Charakter der Studie: Die Studie zur summativen Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenphysik hat explorativen Charakter. Das erkennt man an den offenen Formulierungen der Forschungsfragen, die anhand der Stichprobe zu beantworten sind. Es geht nicht darum, theoretisch begründete Hypothesen über das Lernen von Quantenphysik zu überprüfen. Solche Hypothesen wären nämlich nicht aus theoretischer Fundierung ableitbar, weil zum Lernen und zum Lehren moderner Quantenphysik an Gymnasien keine empirischen Vorarbeiten mit vergleichbarem Hintergrund publiziert sind. Es geht in dieser Studie daher auch nicht darum, das Konzept unter möglichst realen Bedingungen zu testen. Vielmehr interessiert, ob mit Hilfe der neuen Sachstruktur des Konzepts Quantenphysik in der Oberstufe gelernt werden kann, welche Vorstellungen Lernende entwickeln, die vorher nichts über Quantenphysik wussten, ob sie es interessant finden und wie der Zugang aus Sicht der Lehrkräfte beurteilt wird. Die zur Klärung der Forschungsfragen gerechneten statistischen Tests (für Details zur Auswertemethodik vgl. Kapitel 4.4.1 für den Vorstellungsfragebogen, Kapitel 4.4.2 für die Interviewstudie und Kapitel 7 für grundlegende statistische Verfahren), dienen also nicht dem Testen zuvor theoretisch abgeleiteter Hypothesen. Signifikante Ergebnisse, die sich im Rahmen der hier berichteten Studie ergeben, bestätigen also deswegen auch nicht einen vorhergesagten Effekt, sondern ermöglichen die Formulierung von Hypothesen für Forschungsarbeiten der Zukunft [51, S. 627].

Schulorganisatorischer Rahmen: Die Untersuchung findet in der gymnasialen Oberstufe statt. Das Erlanger Unterrichtskonzept zur Quantenoptik ist auf vier Schulstunden ausgelegt. Vor der Intervention fand ein Prätest zum deklarativen Wissen in Quantenoptik statt, nach der Intervention ein Post- und ein Follow-Up-Test. Der Posttest enthielt unter anderem einen Vorstellungsfragebogen nach [143] (vgl. Kapitel 4.4.1). Der Follow-Up-Test wurde von den Probandinnen und Probanden circa zwei Wochen nach der Intervention bearbeitet und beinhaltete die gleichen Items, wie Prä- und Posttest. Die leitfadengestützten Interviews fanden ebenfalls in diesem Zeitraum nach der Intervention statt (vgl. Kapitel 4.4.2).

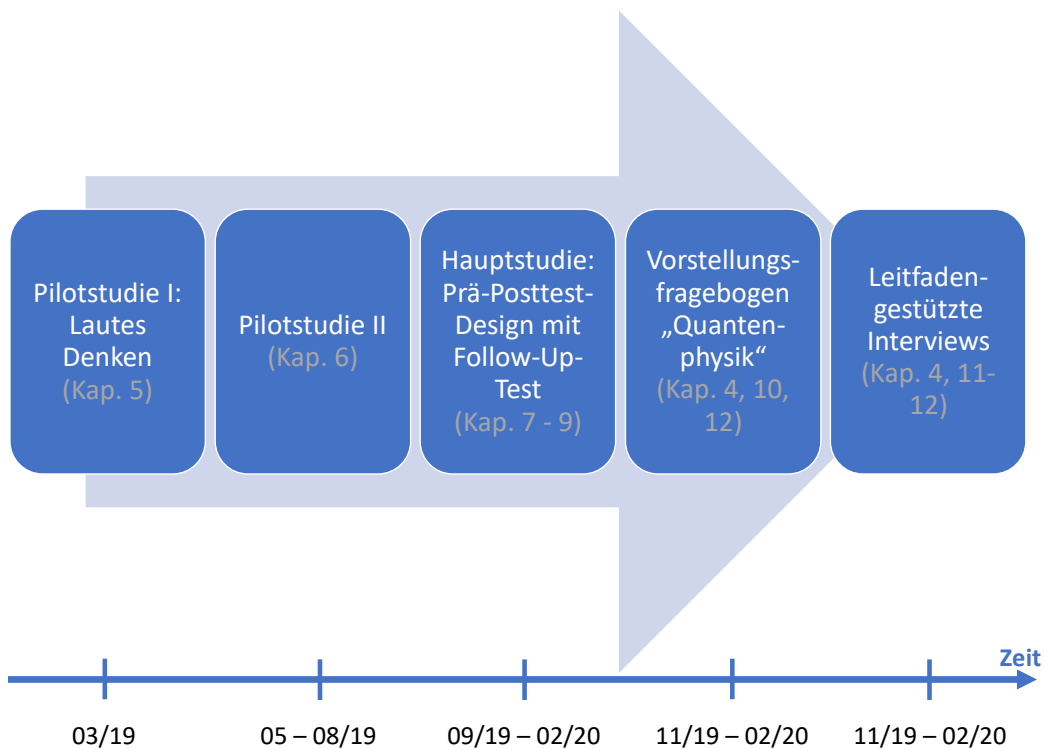


Abbildung 4.2: Nach Abschluss der beiden Pilotstudien im August 2019, folgte zum Schuljahresbeginn 2019 die Hauptstudie. Im Oktober 2019 wurde der Posttest um den Vorstellungsfragebogen ergänzt. Außerdem wurden 25 Schülerinnen bzw. Schüler retrospektiv interviewt. Die Hauptstudie endete nach dem ersten Schulhalbjahr 2019/20.

Aus inhaltlicher Sicht sind die vier angesetzten Unterrichtsstunden das Minimum, aber aus schulorganisatorischer Sicht sind das immerhin zwei Wochen Physikunterricht in der Oberstufe. Die Teilnahme für Schulen sollte daher so randbedingungsarm wie möglich sein, um eine akzeptable Stichprobengröße zu erreichen. Dass die 12. Jahrgangsstufe verkürzt ist und mit dem Abitur endet, erhöhte die Bereitschaft vieler Schulen zur Teilnahme an der Studie nicht. Der Unterricht der Intervention wurde daher vom Autor dieser Arbeit selbst durchgeführt, und zwar im regulären Physikunterricht und im regulären Physiksaal der teilnehmenden Klassen. Damit wurde versucht, die Anforderungen an teilnehmende Lehrkräfte und ihre Kurse so niedrig wie möglich zu halten. Vor dem Hintergrund einer explorativen Studie ist dies durchaus akzeptabel, obwohl klar ist, dass mögliche mangelnde Objektivität ein Kritikpunkt ist [59]. Eine ausführliche Diskussion über die damit einhergehenden Limitationen der hier berichteten Studie findet man in Kapitel 14.1 dieser Arbeit.

Kontrollgruppenproblem: Normalerweise ist bei Evaluationsstudien, wie sie bei der Beforschung neuer Unterrichtskonzepte üblich sind (z.B. [34]), der Einsatz von Kontroll- und Treatmentgruppen die Regel. Notwendig für eine sinnvolle Vergleichsstudie scheinen aber

1. eine Einigkeit darüber, welche Kompetenzen Schülerinnen und Schüler im Quan-

4.1. FORSCHUNGSFRAGEN UND STUDIENDESIGN

tenphysikunterricht erwerben sollen. Das Erreichen dieses Ziels könnte dann für verschiedene Unterrichtsvorschläge (Kontroll- bzw. Treatmentgruppe) verglichen werden [15].

2. ein Studiendesign und Erhebungsinstrumente, das keine der Vergleichsgruppen bevorzugt. Dies würde zumindest ähnliche Lernziele der Unterrichtsvorschläge voraussetzen [15].

Das Erlanger Unterrichtskonzept zur Quantenoptik unterscheidet sich inhaltlich und in seinen Schwerpunktsetzungen aber fundamental von bestehenden Konzepten (vgl. Kapitel 1). Mit der gleichen Argumentation wie bei [143], sehen wir daher zunächst von einem Kontrollgruppendesign ab.



Im Übrigen ist das Kontrollgruppenproblem für die Evaluationsforschung typisch, dazu schreiben [51, S. 113]: „Die strikte Anwendung von Kontrolltechniken zur Sicherung der internen Validität kann zudem bedeuten, dass die Evaluationsstudie in einem unnatürlichen 'Setting' durchgeführt wird, was wiederum zu Lasten der externen Validität geht.“ Evaluationsforschung sei daher nach Einschätzung von Cronbach eine „Kunst des Möglichen“ [46].

Operationalisierung der Forschungsfragen: Die im Rahmen des Mixed-Methods-Designs eingesetzten Methoden (vgl. Abbildung 4.1) dienen nicht isoliert, sondern zusammengenommen der umfassenden Annäherung an die Klärung der Forschungsfragen. Welche Erhebungsinstrumente bzw. Forschungsmethoden zur Beforschung welcher Forschungsfrage beitragen, wird in Tabelle 4.1 dargestellt. In den nächsten Abschnitten wird ein Überblick über diese Erhebungsinstrumente gegeben.

4.1. FORSCHUNGSFRAGEN UND STUDIENDESIGN

| | FF 1 | FF 2 | FF 3 | FF 4 | FF 5 | FF 6 | Erhebungszeitpunkte |
|--|------|------|------|------|------|------|---|
| Skala „Selbstkonzept Physik“ [83] | | | | | | | Prätest |
| Skala „Interesse an Physik“ [83] | | | | ✓ | ✓ | | Prätest / Posttest |
| Skala „Interesse an Experimenten im Physikunterricht“ [187, 223] | | | | ✓ | ✓ | | Prätest / Posttest |
| Skala „Aktuelles Interesse Physik“ [83, 187, 223] | | | | ✓ | ✓ | | Posttest |
| „Smileyabfragen“ [24] | | | | | ✓ | | Nach jeder Unterrichtsstunde während Intervention |
| Testinstrument „Quantenoptik“ | ✓ | | | ✓ | | | Prätest / Posttest / Follow-Up-Test |
| Vorstellungsfragebogen [143] | | ✓ | ✓ | | | | Posttest |
| Leitfadeninterviews | ✓ | ✓ | (✓) | | | | Retrospektiv nach Intervention |
| Lehrkräftefragebogen | | | | | | ✓ | Retrospektiv nach Intervention |

Tabelle 4.1: Darstellung der in der Studie eingesetzten Erhebungsinstrumente bzw. Methoden und ihre Zuordnung zu den Forschungsfragen (vgl. Abschnitt 4.1.1). Die Skala zum Selbstkonzept dient vor allem der Überprüfung der konvergenten Validität der Skalen zu affektiven Lernermerkmalen und ist deswegen nicht mit einer konkreten Forschungsfrage assoziiert. Tabelle bereits publiziert in [15].

Wir gehen noch kurz genauer auf die Operationalisierung der Forschungsfrage 1 ein, weil dort einzelne Begriffe noch genauer erläutert werden müssen. Forschungsfrage 1 lautet:

FF 1: Erreichen die Lernenden durch das Unterrichtskonzept ein umfassendes Begriffswissen zur Quantenoptik?

FF 1a: Führt das Unterrichtskonzept zu einem angemessenen und sicheren deklarativen Wissen zur Quantenoptik?

FF 1b: Sind die Schülerinnen und Schüler in der Lage, mit den Begriffen der Quantenoptik zu argumentieren und Zusammenhänge herzustellen?

Zur Feststellung des deklarativen Wissens zur Quantenoptik kommt ein neu entwickeltes Testinstrument zur Quantenoptik zum Einsatz, welches in Kapitel 4.3 im Detail vorgestellt wird. Nach der Intervention soll von einem *angemessenen* deklarativen Wissen ausgegangen werden, wenn die Lernenden im Mittel mindestens 50% der Testitems richtig bearbeiten. Dabei werden solche Items nicht mitgezählt, bei denen Probanden zwar richtig liegen, aber geraten haben. Dazu wird im Test den Lernenden die Möglichkeit der Selbsteinschätzung in der Antwortsicherheit auf einer fünfstufigen Ratingskala für jedes Item geben (1 = sehr sicher, 2 = sicher, 3 = unentschlossen, 4 = unsicher, 5 = geraten). Wir wollen das deklarative Wissen letztlich als *sicher* einstufen, wenn die mittlere Antwortsicherheit der Lernenden im Posttest kleiner als 3.0 ist.

Was bei Forschungsfrage 3

FF 3: Gelangen die Schülerinnen und Schüler zu quantenphysikalisch adäquaten Vorstellungen zur Eigenschaft Ort sowie zur Wahrscheinlichkeitsdeutung in der Quantenphysik?

mit dem Wort *adäquat* gemeint wird und inwiefern dies gemessen wird, sehen wir in Kapitel 4.4.1.

4.2 Erhebungsinstrumente zu affektiven und kognitiven Lernermerkmalen

4.2.1 Erhebungsinstrumente zu affektiven Lernermerkmalen

Alle nachfolgend dokumentierten Skalen sind als fünfstufige Ratingskalen realisiert. Den Ergebnissen von Rohrmann folgend, wird auf numerisch und sprachlich gegliederte Antwortskalen zurückgegriffen [168]². Eine ausführliche Diskussion bezüglich des Skalenniveaus von mit Ratingskalen erhobenen Variablen findet man im Kapitel 7.3 dieser Arbeit, in der die Auswertemethodik genauer vorgestellt wird. Alle nachfolgend vorgestellten Skalen finden sich im Testheft. Dieses ist dieser Arbeit in Anhang C beigelegt.

Skala zum fachbezogenen Selbstkonzept Unter dem Begriff Selbstkonzept versteht man mentale Repräsentationen von Personen über sich selbst [140]. Diese können sich sowohl auf die ganze Person, oder aber auf einzelne Bereiche, wie zum Beispiel die Physik, beziehen (ebd.). Die von [83] entwickelte Skala mit acht Items erhebt das auf das Fach Physik bezogene Selbstkonzept. Das Selbstkonzept ist ein stabiles Konstrukt, sodass ein Einsatz im Prätest genügt [169]. In der hier vorgestellten Studie ergibt sich für die Skala eine Reliabilität von $\alpha = 0.91$ ³.

Skala zum Interesse an Physik Auch das Interesse der Probandinnen und Probanden für Physik wurde mit Hilfe einer Skala von [83] erhoben. Die Skala besteht aus 6 Items

²1 = stimmt gar nicht, 2 = stimmt überwiegend nicht, 3 = stimmt teils, teils, 4 = stimmt überwiegend, 5 = stimmt völlig.

³Diese und alle weiteren Reliabilitätskoeffizienten wurden berechnet mit SPSS 25.

und wurde in Prä- und Posttest eingesetzt, um das stabile Konstrukt Interesse evaluieren zu können [105]. In der hier vorgestellten Studie ergibt sich für die Skala eine Reliabilität von $\alpha = 0.88$ im Prätest und $\alpha = 0.89$ im Posttest.

Skala zum Interesse am Experimentieren im Physikunterricht Obwohl im Rahmen der Intervention keine Realexperimente gezeigt werden, spielt das naturwissenschaftliche Arbeiten und Experimentieren eine zentrale Rolle. Insofern erscheint eine Erhebung des Interesses der Schülerinnen und Schüler am Experiment im Physikunterricht logisch. Winkelmann [223, S. 59] adaptierte zu einem ähnlichen Zweck eine Skala aus der Chemiedidaktik von [187]. Diese Skala mit neun Items wurde in dieser Studie eingesetzt und wies eine Reliabilität von $\alpha = 0.85$ im Prätest, sowie $\alpha = 0.88$ im Posttest auf.

Skala zum „Aktuelles Interesse“ an Physik Mit der Skala zum „Aktuellen Interesse“ wurde das Interesse der Lernenden bezogen auf den Physikunterricht der Intervention erhoben, sodass diese nur im Posttest eingesetzt wurde. Die Skala besteht aus neun Items und wurde von [223] übernommen. In der hier vorgestellten Studie ergibt sich für die Skala eine Reliabilität von $\alpha = 0.91$.

„Smileyabfrage“ Die Interessantheit des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik für die Schülerinnen und Schüler wird interventionsbegleitend auf einer dreistufigen Smiley-Skala abgefragt [24] (vgl. Testheft in Anhang C).



Man mag eine solche Smileyabfrage zunächst als unwissenschaftlich empfinden. Korrelationen der Smiley-Skala mit der Skala „Aktuelles Interesse an Physik“ sind aber statistisch signifikant (vgl. Tab. 4.2): diese bekräftigen demnach die Nützlichkeit beider Erhebungsinstrumente gleichermaßen und sprechen folglich für den Einsatz der Smiley-Skala zur Beurteilung des Interesses der Schülerinnen und Schüler an einzelnen Abschnitte der Intervention.

| | Smiley- Abfrage Kapitel 1 | Smiley- Abfrage Kapitel 2 | Smiley- Abfrage Kapitel 3 | Smiley- Abfrage Kapitel 4 |
|---------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| „Aktuelles Interesse“ an Physik | 0.42 | 0.47 | 0.51 | 0.48 |
| Sign. (2-seitig) | $p < 0.01$ | $p < 0.01$ | $p < 0.01$ | $p < 0.01$ |

Tabelle 4.2: Korrelationen zwischen Smiley-Abfrage und der Skala zum „Aktuelles Interesse“ an Physik.

4.2.2 Erhebungsinstrumente zu kognitiven Lernermerkmalen

Zur Beurteilung der konvergenten und diskriminanten Validität des Testinstruments zum Begriffswissen Quantenoptik (vgl. nächster Abschnitt 4.3) wurden in dieser Studie die

4.3. ERHEBUNGSINSTRUMENT ZUM BEGRIFFSWISSEN QUANTENOPTIK

Skala Q2 aus dem Kognitions-Fähigkeitstest (KFT), sowie der LGVT 5-12+ zur Beurteilung der Lesekompetenz eingesetzt.

KFT 4-12+ R - Subtest Q2 Die Erhebung der kognitiven Fähigkeiten wurde mit Hilfe der Skala Q2 des KFT4-12+ R durchgeführt [77]. Mittels dieser Skala werden das zahlengebundene und das logische Denken erfasst, indem die Schülerinnen und Schüler gegebene Zahlenfolgenden geeignet ergänzen. Man erwartet einen Zusammenhang dieser Skala mit dem Test zum deklarativen Wissen in Quantenoptik (vgl. Ergebnisse dazu in Kapitel 8) - eine Feststellung signifikanter positiver Korrelationen spräche also für die konvergente Validität des Tests zum Begriffswissen Quantenoptik.

LGTV 5-12+ Der LGTV 5-12+ ist eine erweiterte und erneuerte Form des LGTV 6-12. Er dient der Erhebung von Lesegeschwindigkeit-, Lesegenauigkeit und Leseverständnis [179]. Die Probandinnen und Probanden lesen einen Text und unterstreichen an verschiedenen Stellen (den jeweiligen Items), stets eines von drei gegebenen Wörtern derart, dass es den Text inhaltlich und sprachlich geeignet ergänzt. Die diskriminante und konvergente Validität des LGTV 5-12+ wurde mittels Korrelationsanalysen zu verschiedenen Außenkriterien, unter anderem dem KFT, überprüft. Große Normierungstichproben erlauben eine Einordnung der jeweiligen Schülerleistungen im Vergleich zu Normwerten getrennt nach Klassenstufe und Schulform [179].

In der vorliegenden Studie wurde der LGTV 5-12+ primär zur Sicherung der diskriminanten Validität des Fachwissenstests zur Quantenoptik (vgl. Kapitel 4.3) eingesetzt: Mit diesem soll deklaratives Wissen zur Quantenoptik gemessen werden. Er soll dazu beitragen, zwischen Schülerinnen und Schülern mit einer hohen (viel deklaratives Wissen) und einer niedrigen (wenig deklaratives Wissen) Merkmalsausprägung zu unterscheiden. Der Testscore darf dazu aber nicht zu sehr abhängig sein von solchen Merkmalen, die mit dem deklarativen Wissen in Quantenoptik nichts zu tun haben, etwa dem Leseverständnis oder der Lesegenauigkeit. Um auszuschließen, dass eine hohe Punktzahl im Test zur Quantenoptik zu großen Teilen auf genaueres und exakteres Lesen zurückzuführen ist, wird daher eine Korrelationsanalyse mit dem LGTV 5-12+ durchgeführt. Zwar ist zu erwarten, dass eine höhere Lesegenauigkeit in gewissem Rahmen auch zu tendenziell besseren Testergebnissen führt, der Einfluss sollte aber nicht zu hoch sein.

4.3 Erhebungsinstrument zum Begriffswissen Quantenoptik

Wie bereits in Kapitel 4.1 dargestellt, liegt der hier berichteten Studie ein Mixed-Methods-Design zugrunde, um einer Klärung der Forschungsfragen nahe zu kommen. Der Fachwissenstest zur Quantenoptik, dessen Entwicklung in diesem Abschnitt vorgestellt wird, ist dabei eine von drei unterschiedlichen Erhebungsmethoden. Wir wollen daher die Wichtigkeit dieses Tests nicht überbewerten, werden doch die Vorstellungen und das Verständnis Lernender gerade mit den anderen Erhebungsmethoden (Vorstellungsfragebogen, Interviews) erhoben. Hier soll deswegen festgeschrieben werden, was mit diesem Test **nicht** intendiert wird:

1. Es sollen keine Schülervorstellungen zur Quantenphysik oder gar zur Quantenoptik erhoben werden, die mit dem Erlanger Unterrichtskonzept zur Quantenoptik womöglich gefördert werden. Um einen Eindruck über die quantenphysikalische Adäquatheit der Schülervorstellungen zu erhalten, wird der Vorstellungsfragebogen nach Müller eingesetzt (vgl. Kapitel 4.5). Informationen darüber, welche Vorstellungen genau die Lernenden entwickeln, erhält man aus der Interviewstudie (vgl. Kapitel 4.5).
2. Es soll nicht die Fähigkeit der Schülerinnen und Schüler erhoben werden, innerhalb des neu zur Verfügung gestellten begrifflichen Rahmens konsistent zu argumentieren. Dazu werden in dieser Studie leitfadengestützte Interviews eingesetzt (vgl. Kapitel 4.5).
3. Keinesfalls soll von den Testergebnissen auf ein Verständnis der Quantenoptik geschlossen werden können.

Das Ziel, welches mit dem Testinstrument verfolgt wird, ist die Erhebung des deklarativen Begriffswissens zur Quantenoptik. Es wird damit also die Klärung der ganz zentralen Frage - *Lernen die Schülerinnen und Schüler die zentralen Begriffe zur Quantenoptik, die im Erlanger Unterrichtskonzept vermittelt werden sollen?* - verfolgt. Die Bejahung dieser Frage wird als notwendige Voraussetzung empfunden für ein Verständnis jedweder Art oder den Aufbau quantenphysikalisch adäquater Vorstellungen.

Eine Übersicht über publizierte Testinstrumente zur Quantenphysik im nächsten Abschnitt begründet die Neuentwicklung eines Testinstruments für die oben beschriebenen Zwecke.

4.3.1 Testinstrumente zur Quantenphysik

Die Beforschung von Schülervorstellungen zur Quantenphysik hat mittlerweile eine lange Tradition (vgl. Kapitel 1). Dennoch existiert bis heute kein einheitliches und verbreitetes Testinstrument zur Quantenphysik. Es gibt zwar eine große Zahl von Instrumenten mit unterschiedlichen Formaten und thematischen Schwerpunkten, aber nur eine kleine Zahl hat Schülerinnen und Schüler als Primärzielgruppe. Tabelle 4.3 stützt dieses Argument. Insbesondere existiert kein Instrument mit dem expliziten Fokus auf moderner Quantenphysik und -optik. Dies begründet eine Eigenentwicklung im Zuge des hier vorgestellten Projekts.

4.3. ERHEBUNGSINSTRUMENT ZUM BEGRIFFSWISSEN QUANTENOPTIK

| Test / Autor | Jahr | Fragen-format | Inhaltsschwerpunkt | Zielgruppe |
|--------------------------------|-------------|------------------------------|---|---|
| Ireson [89] | 2000 | Ratingskala-Aufgaben | Quantenphänomene und -modelle | Ursprünglich Studierende (auch für Schülerinnen und Schüler geeignet) |
| Quantum measurement test [193] | 2001 | Offene Fragen | Messprozess und Zeitentwicklung | Studierende |
| QMVI [39] | 2002 | Multiple-Choice (zweistufig) | Quantenphysikalischer Formalismus | Studierende |
| Müller und Wiesner [146] | 2002 | Ratingskala-Aufgaben | Atomvorstellungen, Determinismus, Eigenschaftsbegriff,... | Schülerinnen und Schüler |
| QPCS [224] | 2009 | Multiple-Choice | Welle-Teilchen-Dualismus, de-Broglie-Wellenlänge, Wellenfunktion, ... | Studierende (teils auch für Schülerinnen und Schüler geeignet) |
| QMAT [67] | 2009 | Offene Fragen | Quantenphysikalischer Formalismus | Studierende |
| QMCS [136] | 2010 | Multiple-Choice | Quantenphysikalischer Formalismus | Studierende |
| QMS [226] | 2012 | Multiple-Choice | Quantenphysikalischer Formalismus | Studierende |
| QMCA [172] | 2015 | Multiple-Choice | Quantenphysikalischer Formalismus | Studierende |
| QME [210] | 2019 | Multiple-Choice (zweistufig) | Materiewellen, Messprozess, Atome und Elektronen | Studierende (teils auch für Schülerinnen und Schüler geeignet) |
| QMFPS [129] | 2019 | Multiple-Choice | Quantenphysikalischer Formalismus und Postulate | Studierende |

Abbildung 4.3: Übersicht über publizierte Testinstrumente zur Quantenphysik. Diese Tabelle wurde bereits veröffentlicht in [13].

4.3.2 Entwicklung eines Testinstruments zur Quantenoptik

Teile dieses Kapitels wurden bereits veröffentlicht in [13].

4.3.2.1 Itemkonstruktion

Am Anfang einer Testentwicklung sind zunächst ganz zentrale und pragmatische Fragen zu klären, die nicht nur den Entwicklungsprozess des Instruments selbst, sondern später auch die Ergebnisse der Erhebung beeinflussen [148]. Dazu zählen zum Beispiel (nach [31, 109]):

Festlegen der Zielgruppe: die primäre Zielgruppe bei der Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts sind Schülerinnen und Schüler der gymnasialen Oberstufe.

Festlegung des Testziel: Typischerweise differenziert man Tests hinsichtlich ihres Testziels, also danach, ob sie erstens Eigenschafts- oder Fähigkeitsausprägungen erheben, zweitens die Klassifikation von Personen oder drittens die Erfassung von Wissen zum Ziel haben. In diese dritte Kategorie fällt das hier entwickelte Testinstrument: es soll das deklarative Wissen zur Quantenoptik erhoben werden.

Beschreibung des Wissensbereichs: Eine literaturgestützte Präzisierung des Wissensbereichs *Quantenoptik* ist nicht möglich, weil vergleichbare Erhebungen zu vergleichbaren Konzepten noch nicht durchgeführt wurden. Eine Möglichkeit einer Annäherung an ein Strukturmodell des Wissensbereichs bietet die Anfertigung eines sogenannten Blueprints. Unter einem sogenannten Blueprint versteht man eine Tabelle, welche die im Test zu prüfenden Inhalte einerseits und die in diesen einzelnen Inhaltsbereichen zu erreichenden Leistungsniveaus der Schülerinnen und Schüler andererseits enthält [106]. Ein solches Blueprint wurde im Anfangsstadium der Testentwicklung gemäß den Schritten nach Flateby angelegt [61]. So wird von Beginn der Entwicklung an sichergestellt, dass die entwickelten Items das Konstrukt „in adäquater Weise repräsentieren“ [222, S. 10].

Entscheidung für ein Aufgabenformat: „Aus ökonomischen Gründen fiel die Entscheidung auf ein geschlossenes Aufgabenformat“ [13]. Dieses Format ermöglicht eine objektive Datenauswertung, erfordert aber die Entwicklung attraktiver Distraktoren [204]. Die Entscheidung fiel auf zweistufige Items. In der ersten Stufe entscheiden sich die Schülerinnen und Schüler für genau eine von drei Antwortmöglichkeiten. In der zweiten Stufe sollen sie zusätzlich auf einer fünfstufigen Ratingskala angeben, wie sicher sie sich bei der Antwort in Stufe eins waren⁴. Mittels dieser zusätzlichen Angabe der Antwortsicherheit, soll primär der Rateeinfluss minimiert werden [23]. Dazu wird ein Punkt genau dann vergeben, wenn erstens in Stufe eins die richtige Antwortmöglichkeit gewählt wurde, und der Proband bzw. die Probandin sich dabei mindestens sicher war. Dies führt allenfalls zu einer Unter-, aber keinesfalls zu einer Überschätzung des Lernzuwachses und folglich zu einer etwas konservativeren Einschätzung der Ergebnisse.

⁴sehr sicher - sicher - unentschlossen - unsicher - geraten.

Einheitliche Itemformulierung: Bei der Formulierung von Items - bei Itemstamm genauso, wie bei den Distraktoren - wurde auf einfache Sprache und klare Formulierungen geachtet⁵. Zentrales Hilfsmittel zur Formulierung von Items stellt die *cover-the-options-rule* dar, nach der ein Proband oder eine Probandin mit hinreichendem Wissen ein Item auch ohne die gegebenen Antwortmöglichkeiten beantworten können sollte [151].

Finden geeigneter Distraktoren: Für die Qualität von Items ist weiter die Qualität der Distraktoren, also der falschen Antwortoptionen entscheidend. Moosbrugger und Kleva definieren Distraktoren als „plausibel erscheinende, aber nicht zutreffende Antwortalternativen“ [141, S. 418] und drücken damit die Schwierigkeit beim Finden solcher Distraktoren aus: sie müssen von Wissenden als falsch erkannt werden und sollen für Unwissende zutreffend wirken [66]. Eine gängige Methode zur Gewinnung von geeigneten Distraktoren stellt der Einsatz der entsprechenden Fragen zunächst im offenen Format dar, etwa im Rahmen einer Vorstudie. Häufige Fehler ohne Antworten, die nahe an der richtigen Lösung sind, können dann für das Testinstrument verwendet werden [106]. „Bei der Entwicklung des Testinstruments zur Quantenoptik wurden daher zunächst 21 Items - verteilt auf verschiedene Inhaltsbereiche zur Quantenoptik“, gemäß des zuvor entwickelten Blueprints „- im offenen Format formuliert. Diese wurden an $N = 23$ Lehramtsstudierende gegeben. Auf diese Art wurde ein erster Testentwurf gewonnen, weil teilweise richtige, oder auffällig häufig aufgetauchte falsche Antworten [...] als Distraktoren verwendet wurden“ [13]. Die Fragen, die an die Studierenden ausgeteilt wurden, findet man in Anhang C. Auf detailliertere Auswertungen wurde aber verzichtet.

4.3.2.2 Spezifizitätsniveau des abgefragten Wissens

Mit dem Testinstrument soll das Begriffswissen zur Quantenoptik erhoben werden, wie es im Erlanger Unterrichtskonzept vermittelt wird. Dies hat zur Folge, dass das Testinstrument eng auf die Intervention bezogen sein muss. Weil sich dieser Test dem fachspezifischen Wissen widmet, prüfen die Items folgerichtig Wissen niedriger Kompetenzniveaus ab [223]. Der Großteil der Items bezieht sich primär auf Begriffe, teilweise auf Fakten. Transferleistungen, tiefergehendes Verständnis und Vorstellungen werden nicht mit dem Test erhoben, wohl aber mit den anderen im Rahmen der Studie eingesetzten Methoden (leitfadengestützte Interviews, Vorstellungsfragebogen).

4.3.2.3 Struktur des Konstrukts

Die zentralen Aspekte des Erlanger Unterrichtskonzepts bilden das hier zugrunde gelegte Konstrukt Quantenoptik. Die Items des Testinstruments bilden demnach eine große Bandbreite nicht unmittelbar benachbarter Inhaltsbereiche ab. Das Konstrukt Quantenoptik wird in ein Strukturmodell gefasst, welches der Sachstruktur des Erlanger Unterrichtskonzepts entspricht.

⁵Diese Anforderung steht mitunter im Gegensatz zu dem Anspruch nach fachlicher Exaktheit. Im Zweifel wurde der Forderung nach schülergerechten Formulierungen Vorrang gegenüber der uneingeschränkten physikalischen Exaktheit gewährt.

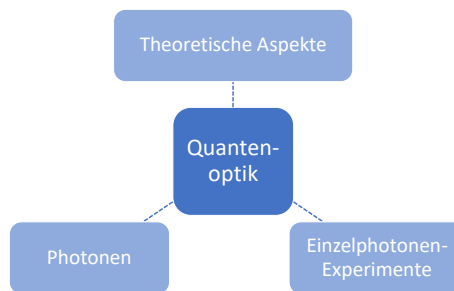


Abbildung 4.4: Das zugrundeliegende Strukturmodell des Konstrukts Quantenoptik. Mit *Theoretische Aspekte* werden Aspekte gemeint, wie Interferenz oder atomare Anregung. Unter dem Teilaspekt *Photonen* werden Items subsummiert, die Modellvorstellungen des Photons adressieren. Unter *Einzelphotonen-Experimente* werden Items die konkreten Experimente und ihre Durchführung betreffend zusammengefasst. Diese Substruktur wird für das neue Testinstrument konfirmatorisch überprüft (vgl. Kapitel 6). Abbildung bereits publiziert in [13].

Am Ende der Pilotstudien (vgl. Kapitel 5 und 6) blieben 13 Items. Jeder Teilaspekt wird also mit mindestens 3 Items abgedeckt. Das fertige Testinstrument kann in Anhang C gefunden werden.

4.3.2.4 Testwertinterpretation

Unter einer validen Testwertinterpretation versteht man, dass Testergebnisse Informationen über ein Konstrukt liefern und zwar mit einer hohen Sicherheit [137, S. 11]. Oft liest man, ein Test sei valide, wenn er misst, was er messen soll [141, S. 13]. Etwas genauer versteht man unter Validität aber, inwiefern Aussagen und Folgerungen aus den Ergebnissen (Testwertinterpretationen) von einem Test gewonnen werden können. Demnach ist die Validierung eines Testinstruments als argumentativer Prozess zu verstehen, mit dem gewisse Interpretationen der Testwerte gestützt werden sollen [137, S. 12]. Notwendige Voraussetzung für diesen Prozess ist, dass zunächst festgelegt wird, welche Testwertinterpretation *angestrebt* wird. Diese bezeichnet man dann als intendierte Testwertinterpretation. Zusätzlich ist festzulegen, auf welchen Annahmen diese intendierte Testwertinterpretation fußt. Erst im Anschluss sind Methoden und Verfahren anzuwenden, um die Gültigkeit dieser Annahmen zu überprüfen. Die im Folgenden vorgestellten Überlegungen wurden für ein anderes Konstrukt bereits von [137] präsentiert und werden in dieser Arbeit auf den Fall der Quantenoptik übertragen bzw. adaptiert.

Intendierte Testwertinterpretation

Das erzielte Testergebnis zeigt, inwiefern die Begriffe der Quantenoptik, wie sie im Erlanger Unterrichtskonzept vermittelt werden, von Schülerinnen und Schülern der gymnasialen Oberstufe gekannt werden. Es kann also als Maß für das deklarative Wissen in diesem Bereich aufgefasst werden.

4.4. ERHEBUNG VON VORSTELLUNGEN UND KONZEPTUELLEM WISSEN ZU DEN WESENSZÜGEN DER QUANTENPHYSIK

Diese intendierte Testwertinterpretation fußt auf den nachfolgend skizzierten Annahmen; deren Überprüfung wird mit den Pilotstudien in den Kapiteln 5 und 6 dieser Arbeit berichtet:

1. Die Items bilden das Konstrukt Quantenoptik gemäß dem Strukturmodell aus Abbildung 4.4 angemessen ab.
2. Die Items rufen bei Schülerinnen und Schüler intendierte kognitive Prozesse hervor, insbesondere sind richtige Antworten nicht (ausschließlich) auf Raten zurückzuführen.
3. Die Items werden wie intendiert verstanden.
4. Die Items und Distraktoren sind für die Schülerinnen und Schüler authentisch.
5. Die intendierten Teilkonstrukte werden angemessen durch die jeweiligen Skalen abgebildet.
6. Das Konstrukt „Quantenoptik“ wird durch den Test zu anderen oder ähnlichen Konstrukten abgrenzbar.

Wie auch bei [137, S. 198] einräumt wird, ist diese Liste prinzipiell beliebig fortsetzbar und ihre Elemente sind nicht trennscharf. Kann die Gültigkeit der formulierten Annahmen 1. - 6. aber empirisch fundiert werden, so dienen diese als Argumente für die Berechtigung „bewertender und generelaisierender Schlüsse“ [137, S. 197] auf Grundlage der Testergebnisse. Den Ansprüchen, die mit dem hier vorgestellten Testinstrument verbunden sind, entsprechend, soll diese Auswahl an Argumenten genügen, die beliebig fortgesetzt werden kann. In diesem Kontext muss betont werden, dass ein solcher Validierungsprozess grundsätzlich niemals abgeschlossen ist, die Validität also keine dem Test innewohnende Eigenschaft sein kann.

In den in Kapitel 5 und 6 vorgestellten Pilotstudien werden Verfahren und Methoden genutzt, um die oben genannten Annahmen zu überprüfen. Bevor aber auf diese im Detail eingegangen wird, sollen nachfolgend noch die beiden anderen Erhebungsverfahren und die zugehörige Auswertungsmethodik vorgestellt werden, damit später in Teil III dieser Arbeit die Ergebnisse der Studie in übersichtlicher Form berichtet werden können, ohne jeweils neu auf die Erhebungsverfahren Bezug nehmen zu müssen.

4.4 Erhebung von Vorstellungen und konzeptuellem Wissen zu den Wesenszügen der Quantenphysik

Zusätzlich zur Erhebung des deklarativen Wissens zur Quantenoptik zielt die vorliegende Studie auch auf die Erhebung von Vorstellungen und konzeptuellem Wissen ab. Unter konzeptuellem Wissen wird hier ein vernetztes Wissen verstanden, also eines, das die Verknüpfung verschiedener Elemente eines Gegenstands und damit das Herstellen von Beziehungen zwischen den Begriffen oder Abstraktionen ermöglicht [4]. Um das konzeptuelle Wissen, das auf der Grundlage des Erlanger Unterrichtskonzept entwickelt wird,

sowie die Vorstellungen der Lernenden zu verschiedenen Aspekten der Quantenphysik zu erheben, die durch das Erlanger Konzept gefördert werden, wurden ein Vorstellungsfragebogen eingesetzt und leitfadengestützte Interviews durchgeführt.

4.4.1 Vorstellungsfragebogen „Quantenphysik“

Im von Müller [146] zur Evaluation des Münchner Quantenmechanikkonzept eingesetzten Vorstellungsfragebogen werden unterschiedliche Themengebiete der Quantenphysik in Itembatterien adressiert und zwar:

- zur Atomvorstellung,
- zur Wahrscheinlichkeitsdeutung der Quantenphysik,
- zum Eigenschaftsbegriff in der Quantenphysik und
- zur Heisenberg'schen Unbestimmtheitsrelation.

Mit Hilfe der Angaben der Schülerinnen und Schüler zu den einzelnen Items auf einer fünfstufigen Ratingskala (Zustimmung bis Ablehnung) kann auf Vorstellungsindizes zu den einzelnen Themengebieten geschlossen werden [143, S. 149]. Diese Vorstellungsindizes sind auf eine Skala von -100 bis $+100$ genormt, wobei ein Indexwert von $+100$ bedeutet, dass quantenphysikalisch adäquate Vorstellungen vorliegen. Ein Indexwert von -100 drückt aus, dass die Vorstellungen im genauen Kontrast zur quantenphysikalischen Vorstellung stehen [143, S. 149]. Nicht jedes Item geht dabei gleich in den Indexwert ein: je nach Wichtigkeit gewichtete Müller einzelne Fragen einfach, andere doppelt (Gewichtungsfaktoren $g_i \in \{-2, \dots, 2\} \subset \mathbb{Z}$). Items, deren Aussage mit der quantenphysikalisch adäquaten Vorstellung übereinstimmen, haben positive Gewichtungsfaktoren, sonst sind diese negativ [143, S. 150f.]. Die Berechnung des Indexwerts C ergibt sich, wie bei [143] erläutert, zu:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n g_i \cdot 50 \cdot (v_i - 3)}{\sum_{i=1}^n |g_i|},$$

wobei mit v_i die Angabe der Befragten im Item i gemeint ist, also $v_i \in \{1, \dots, 5\}$.

Der Einsatz des Vorstellungsfragebogens in der hier berichteten Studie bringt einen entscheidenden Mehrwert mit sich: Weil die Aussagen der einzelnen Items nicht aus dem Erlanger Unterrichtskonzept stammen, birgen die Angaben der Befragten nicht die Gefahr, eine bloße Reproduktion von Merksätzen aus der Intervention zu sein. Stattdessen erlauben sie einen guten Einblick in den Erfolg der Intervention über die Vermittlung von deklarativem Wissen hinaus. Dieser Einblick wird durch die leitfadengestützten Interviews komplettiert.

Im Erlanger Unterrichtskonzept zur Quantenoptik wird weder die Atomphysik, noch die Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation behandelt, sodass auf diese Itembatterien aus dem Vorstellungsfragebogen verzichtet wird. Außerdem wurden die Items aus dem Vorstellungsfragebogen von Müller, die Situationen *einzelner Elektronen am Doppelspalt* thematisieren, adaptiert: die Aussagen wurden in das konzeptionell äquivalente Setting

4.4. ERHEBUNG VON VORSTELLUNGEN UND KONZEPTUELLEM WISSEN ZU DEN WESENSZÜGEN DER QUANTENPHYSIK

einzelnes Photon im Interferometer übertragen. Die physikalische Aussagen bleiben dadurch inhaltlich gleich. Die Ergebnisse aus dem Vorstellungsfragebogen werden in Kapitel 10 dieser Arbeit diskutiert.

Items zum Eigenschaftsbegriff in der Quantenphysik

Im Interferometer verhält sich das Photon wie ein Teilchen und wie eine Welle. Es ist keines von beidem. ($g_1 = 1$)

Wenn das Photon im Interferometer zum Detektor fliegt, nimmt es einen ganz bestimmten Weg, auch wenn ich ihn nicht bestimmen kann. ($g_2 = -1$)

Das Photon läuft einen bestimmten Weg, unabhängig davon, ob ich den Weg beobachte oder nicht. ($g_3 = -1$)

Die augenblickliche Position zwischen Quelle und Detektor ist prinzipiell unbestimmt. ($g_4 = 2$)

Die augenblickliche Position eines Photons zwischen Quelle und Detektor ist nicht prinzipiell unbestimmt, sondern dem Experimentator unbekannt. ($g_5 = -2$)

In der Quantenphysik ist es möglich, dass ein Quantenobjekt klassisch wohldefinierte Eigenschaften, wie den Ort, nicht besitzt. ($g_6 = 2$)

Tabelle 4.3: Items aus dem Vorstellungsfragebogen nach [143] zum Eigenschaftsbegriff übersetzt in das Setting *einzelnes Photon im Interferometer*. Die Gewichtungsfaktoren $g_i \in \{\pm 1, \pm 2\}$ sind angegeben.

Items zur Wahrscheinlichkeitsdeutung der Quantenphysik

Über das Verhalten einzelner Photonen im Interferometer kann ich keine Aussagen machen. Ich kann nur Aussagen über das statistische Verhalten vieler gleichartig präparierter Photonen machen. ($g_1 = 2$)

Niemand kann mit Sicherheit sagen, ob ein Photon am Strahlteiler transmittiert oder reflektiert wird. ($g_2 = 2$)

Bei ausreichend genauer Kenntnis der Anfangsbedingungen könnte man vorhersagen, ob ein einzelnes Photon am Strahlteiler transmittiert oder reflektiert wird. ($g_3 = -2$)

Bei ausreichend genauer Kenntnis der Anfangsbedingungen könnte man in der klassischen Physik das Ergebnis des Würfelwurfs vorhersagen. ($g_4 = 1$)

Tabelle 4.4: Items aus dem Vorstellungsfragebogen nach [143] zur Wahrscheinlichkeitsdeutung übersetzt in das Setting *einzelnes Photon im Interferometer*. Die Gewichtungsfaktoren $g_i \in \{\pm 1, \pm 2\}$ sind angegeben. Die Items wurden in der Studie mit denen zur Eigenschaft Ort durchmischt ausgegeben.

Es lassen sich auf diese Weise sowohl Indizes für die einzelnen Bereiche *Wahrscheinlichkeitsaussagen* und *Eigenschaftsbegriff* berechnen, als auch ein übergreifender

Gesamtindex. Dieser fungiert als Maß für die Adäquatheit quantenphysikalischer Vorstellungen.

4.4.2 Leitfadengestützte Interviews in der Retrospektive

Die Interviewstudie entspricht dem qualitativen Studienteil im Rahmen der summativen Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik. Sie dient gemeinsam mit dem geschlossenen Fachwissenstest und dem Vorstellungsfragebogen zur Triangulation (vgl. Kapitel 12), damit die Lernprozesse der Schülerinnen und Schüler aus mehreren Perspektiven nachgezeichnet werden können. Es soll mit den Interviews das Verständnis der Schülerinnen und Schüler für die Wesenszüge *Statistisches Verhalten* und *Fähigkeit zur Interferenz* in der Quantenphysik evaluiert werden, wie sie Müller und Kübelbeck formulierten (vgl. Kapitel 1.3). Außerdem ermöglicht die Interviewstudie Einblicke in die Vorstellungen Lernender zu Aspekten der Quantenphysik.

Der zentrale Beitrag der Interviewstudie zur summativen Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts bezieht sich also auf die beiden Forschungsfragen FF 1b und FF 2 (vgl. Kapitel 1.2). Weil Forschungsfragen keine Interviewfragen sind, lohnt sich eine genauere Explizierung dieser Forschungsfragen, um diese in sinnvolle Fragestellungen für einen Interviewleitfaden zu übersetzen [149]. Mit der Interviewstudie sollen die nachfolgenden Fragen geklärt werden:

4.4. ERHEBUNG VON VORSTELLUNGEN UND KONZEPTUELLEM WISSEN ZU DEN WESENSZÜGEN DER QUANTENPHYSIK

| Forschungsfragen zur Interviewstudie | Adressierte Forschungsfrage |
|--|-----------------------------|
| ff 1: Was macht für die Schülerinnen und Schüler die Quantenwelt aus? | - |
| ff 2: Gelangen die Schülerinnen und Schüler zu einem Verständnis des Wesenszugs „Statistisches Verhalten“ der Quantenphysik? | FF 2 |
| ff 3: Gelangen die Schülerinnen und Schüler zu einem Verständnis des Wesenszugs „Fähigkeit zur Interferenz“ der Quantenphysik? | FF 2 |
| ff 4: Welche Vorstellung zum Photon entwickeln Schülerinnen und Schüler im Rahmen des Erlanger Unterrichtskonzept zur Quantenoptik? | FF 1b, FF 3 |
| ff 5: Erreichen die Schülerinnen und Schüler ein konzeptuelles Verständnis | FF 1b |
| <ul style="list-style-type: none"> a) für die Eigenschaft „Ort“ in der Quantenphysik? b) für die Präparation von Quantenzuständen? c) für die Antikorrelation am halbdurchlässigen Spiegel? | |

Tabelle 4.5: Teilforschungsfragen ff der Interviewstudie und ihr Beitrag zu den Forschungsfragen im Rahmen der summativen Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik (vgl. Kapitel 4.1). ff 1 dient als gesprächsinitierender Einstieg und ist daher nicht direkt einer der Forschungsfragen FF 1-6 zuzuordnen.

Die Interviews sind als Einzelinterviews angesetzt und wurden gemäß den Empfehlungen von Hopf vom Autor der Arbeit selbst durchgeführt, weil das Nachfragen oder Vertiefen an unterschiedlichen Stellen des Interviews die Vertiefung in das Projekt erfordert [86]. Der Interviewleitfaden wurde gemäß den Anforderungen an einen *guten Interviewleitfaden* nach [149, S. 126] entwickelt. Der letzten Endes zu Zwecken der Studie eingesetzte Leitfaden ist das Ergebnis von einem mehrschrittigen Entwicklungsprozess inklusive Pilotinterview und Expertengesprächen, wie bei [149, S. 130] empfohlen. Der Interviewleitfaden ist in drei Teile untergliedert und kann in Anhang G dieser Arbeit eingesehen werden:

4.4. ERHEBUNG VON VORSTELLUNGEN UND KONZEPTUELLEM WISSEN ZU DEN WESENSZÜGEN DER QUANTENPHYSIK

| Teil | Beschreibung | Beispielfrage(n) |
|------|--------------------------------|---|
| 1 | Gesprächsinitierender Einstieg | Beschreibe doch einmal, was für dich die Quantenwelt ausmacht. (→ ff 1) |
| 2 | Wesenszüge der Quantenphysik | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Beschreibe und erkläre doch einmal die folgende Aussage: „Einzelne Quantenobjekte können zu einem Interferenzmuster beitragen, wenn es für das Versuchsergebnis mehr als eine klassisch denkbare Möglichkeit gibt.“ (→ ff 2) ▪ Jemand behauptet, dass ein Photon im Doppelspalt immer entweder durch den rechten oder durch den linken Spalt geht. Wie kannst du ihn widerlegen? (→ ff 3, ff 5a) |
| 3 | Quantenoptik | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Was ist deine Vorstellung zu einem Photon? (→ ff 4) ▪ Begründe bitte, warum es in Quantenexperimenten nicht reicht mit einem einzigen Einzelphotonendetektor zu arbeiten. (→ ff 5b) |

Tabelle 4.6: Überblick über die Struktur des Interviewleitfadens mit Beispielfragen. Den gesamten Interviewleitfaden findet man im Anhang G dieser Arbeit.

Die Auswertung der einzelnen Interviewteile erfolgt unterschiedlich:

- Teile 1 und 2, 3 (teilweise): Auswertung mittels qualitativer Inhaltsanalyse nach [133] zur Klärung von Forschungsfragen ff 1 - ff 5a
- Teil 3: Bewertung der Schülerantworten auf einer dreistufigen Skala (0 = unvollständige oder falsche Lösung, 1 = teilweise richtige Lösung mit überwiegend richtiger Verwendung und Verknüpfung der Fachtermini, 2 = vollständig richtige Lösung) Skala zur Klärung von Forschungsfragen ff 5b und ff 5c.

Die detaillierte Darstellung der Kodierleitfäden zur Auswertung sowie die Definition der Stufen zur Bewertung der Schülerantworten für alle Teile 1-3 der Interviews finden sich

4.4. ERHEBUNG VON VORSTELLUNGEN UND KONZEPTUELLEM WISSEN ZU DEN WESENSZÜGEN DER QUANTENPHYSIK

mit Ankerbeispielen in Anhang G. Die Ergebnisse der Interviewstudie werden in Kapitel 11 dieser Arbeit beleuchtet.



Gütekriterien in der qualitativen Forschung. Die Gütekriterien, wie sie von Erhebungsverfahren aus der quantitativen Forschung zu erfüllen sind, können nicht eins zu eins in die qualitative Forschung übertragen werden [122, S. 206]. Damit die Validität von Interviewstudien gesichert wird, werden die folgenden Gütekriterien vorgeschlagen [149, S. 123f.]:

- **Verfahrensdokumentation:** Bedingungen und Verfahren bei der Erhebung, Aufbereitung und Auswertung der Daten müssen nachvollziehbar und detailliert dargestellt werden.
- **Datendokumentation:** Kontrolliertes Vorgehen von der Transkription bis hin zur Auswertung.
- **Mitwirkung der Probanden:** Schaffung einer vertrauensvollen Atmosphäre, die die Probandinnen und Probanden von einer Prüfungssituation unterscheiden können, damit diese ihre Vorstellungen authentisch äußern.
- **Interne Triangulation:** an unterschiedlichen Stellen des Interviews wird auf gleiche Aspekte Bezug genommen.

In dieser Arbeit wurde auf die Erfüllung dieser Anforderungen im Rahmen der Interviewstudie folgendermaßen geachtet:

| Gütekriterium | Sicherung in dieser Studie |
|--------------------------|--|
| Verfahrensdokumentation | Darstellung von Kodierleitfäden und Erwartungshorizonten, Ankerbeispielen, ... |
| Datendokumentation | Aufnahme von Audiodateien und Anfertigung von Transkripten |
| Mitwirkung der Probanden | Beginn der Interviews mit Vorstellung von Interviewer und Zweck der Studie |
| Interne Triangulation | Interviewleitfaden mit drei Teilen, die auf unterschiedlichem Niveau auf ähnliche Aspekte rekurren |

Tabelle 4.7: Gütekriterien im Kontext der Interviewstudie zur summativen Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik. Die Transkriptionen der Interviewstudie sind dieser Arbeit mit der Daten-CD beigefügt.

KAPITEL 5

Pilotstudie I: Lautes Denken

„Der Kopf ist rund, damit das Denken die Richtung ändern kann.“

- Francis Picabia

Einordnung in den Kontext der Arbeit

Eine Möglichkeit, die Qualität von Testitems schon in einem frühen Entwicklungsstadium zu überprüfen, stellt die Methode des „Lauten Denken“ dar. In einer „Laute-Denken“- Erhebung wurde die erste Version des im vorherigen Kapitel dargestellten Testinstruments mit $N = 8$ Schülerinnen und Schülern geprüft. Die Items wurden auf Grundlage der Ergebnisse sprachlich weiterentwickelt und drei Items sind neu entstanden. Ein Item wurde ausgeschlossen. Die Ergebnisse der Laute-Denken-Erhebung stellen einen Teil des argumentativen Prozesses hin zu einer validen Testwertinterpretation dar und stützt dabei die Annahmen 2 bis 4, auf denen die intendierte Testwertinterpretation aus Kapitel 4 fußt (vgl. 4.3.2.4). Mit der weiterentwickelten Version des Testinstruments wurde dann eine Pilotstudie mit größerer Erprobungskohorte und quantitativer Auswertung zur Itemanalyse etc. vorgenommen, die in Kapitel 6 dieser Arbeit vorgestellt wird. Die Inhalte dieses Kapitels wurden bereits publiziert in [13].

5.1 Das Laute Denken als Forschungsmethode

5.1.1 Begriffsklärung

„Die Methode des *Lauten Denkens*, manchmal auch *Think Aloud* oder *Denke-Laut-Methode*, hat ihren Ursprung in der Denkpsychologie“ [13], wie in [215] dargestellt. Unter *lautem Denken* kann dabei das laute Aussprechen von Gedanken simultan zur Bearbeitung einer Aufgabe verstanden werden [98]. Mit Hilfe der Methode des Lauten Denkens sollen kognitive Prozesse bei lernenden bzw. denkenden Personen offengelegt

5.1. DAS LAUTE DENKEN ALS FORSCHUNGSMETHODE

werden. Dabei werden die Probandinnen und Probanden zur Verbalisierung ihrer Gedanken und Überlegungen aufgefordert.

Im Kontext der Testentwicklung stellt die Methode des Lauten Denkens eine Möglichkeit zur Überprüfung der Aufgabengüte und damit der Item-Validierung dar - sie ist also insbesondere im Rahmen von Pilotstudien dazu geeignet, Informationen über die Wirkung einzelner Items auf Probandinnen und Probanden zu erhalten. Auf diese Weise können möglicherweise kritische Items überarbeitet oder aus dem Item-Set entfernt werden [173]. Dazu wird die Methode des Lauten Denkens meist simultan zur Testbearbeitung eingesetzt, also introspektiv. Neben der Introspektion, d.h. der augenblicklichen Verbalisierung, unterscheidet Konrad [103] noch die unmittelbare Retrospektion (zeitlich direkt an die Introspektion angeschlossen) und die verzögerte Retrospektion (nach der Bearbeitung aller Aufgaben oder gar noch später). Introspektives und retrospektives Lautes Denken unterscheiden sich nicht nur durch die zeitliche Verortung, sondern auch durch die jeweiligen Verbalisierungsinhalte. Während es bei der Introspektion um die Verbalisierung von Inhalten aus dem Kurzzeitgedächtnis geht, greift die unmittelbare Retrospektion Gedankeninhalte auf, die in nicht versprachlichter Form vorliegen und zunächst noch mündlich enkodiert werden müssen (ebd.).

5.1.2 Stärken und Schwächen des Lauten Denkens als Forschungsmethode

In der quantitativen Forschung werden die Vorzüge, wie sie insbesondere die Kognitionspsychologen sehen [54], nicht ohne Einwand geteilt. Insbesondere bestehen Bedenken bezüglich der internen und externen Validität der Erhebungsmethode [190, 225]. Ganz konkret wiederholen sich die drei folgenden Kritikpunkte (dargelegt nach [103]) zur Methode des Lauten Denkens immer wieder:

1. Verbalisierung und Artikulation: Es bestehen Zweifel hinsichtlich der Fähigkeit der sicheren Artikulation von bei Entscheidungen ablaufenden kognitiven Prozessen. Dies schränkt die Validität der Gedankenprotokollierung ein.
2. Vollständigkeit: Es kann nicht von der Vollständigkeit der Berichte ausgegangen werden, da hierarchieniedrige kognitive Prozesse eher automatisch und unterbewusst ablaufen.
3. Veränderung kognitiver Leistung: Es ist denkbar, dass es zu einer Interferenz zwischen der Versprachlichung und dem Problemlöseprozess kommen kann.

Die benannten Schwächen können aber durchaus auch als Stärken der Methode angesehen werden [88, S. 16] (zit. n. [103]):

„Wenn die Verbalisation von Kognitionen im Kontext von Handlungen uns auch nicht notwendig die ‚wirklichen‘, objektiven Handlungsursachen erschließt, so doch die subjektive Sicht des Handlungszusammenhangs - und damit die Orientierung der Person auch in vergleichbaren Situationen.“

Die Erwartungshaltung an die Aussagekraft bzw. Verallgemeinerbarkeit der Ergebnisse ist also eine andere als bei quantitativen Erhebungen [103]: die Breite und Vielfalt der Einsicht ist das primär verfolgte Ziel, nicht aber Repräsentativität oder Vollständigkeit.

5.1.3 Die Methode des Lauten Denkens zur Untersuchung der Validität von Testitems

Zur Erfassung der Validität eines Testinstruments gibt kein Standardverfahren [74, S. 144]. Die Frage danach, ob Testitems ein bestimmtes theoretisches Konstrukt abbilden, erfordert unter anderem Einblicke in die ablaufenden Antwortprozesse aus mehreren Perspektiven. Nicht nur auf inhaltlicher Ebene erscheint in diesem Kontext eine Untersuchung der entwickelten Testitems unmittelbar plausibel: auch die sprachliche Umsetzung muss bedacht werden, weil semantische sowie lexikalische Missverständnisse als Störvariablen auftreten können und somit Einfluss auf Testergebnisse haben können [180, S. 27]

Um zu überprüfen, ob die intendierten fachlichen Zielsetzungen der jeweiligen Items von den Probandinnen und Probanden richtig verstanden werden, ergibt die Evaluierung eines entwickelten Testinstruments mit Hilfe der Methode des Lauten Denkens Sinn [112, S. 88]. Dadurch werden nämlich die ablaufenden kognitiven Prozesse von Befragten bei der Testsituation zugänglich [137, S. 224]. „Insbesondere bei gebundenen Antwortformaten (hier Single-Choice) erscheint eine Untersuchung der Testaufgaben auf der Ebene der Items sinnvoll, weil die Antwortmöglichkeiten mitunter nicht alle denkbaren Reaktionen der Probandinnen und Probanden abdecken, sich gegenseitig beeinflussen oder nicht der natürlich Antwort der Befragten entsprechen“ [13], wie [180, S. 27] darstellt; negative Einflüsse auf die Validität der Erhebungsergebnisse können die Folge sein [171, S. 61], wie auch [180] festhält.

5.2 Stichprobe und methodisches Vorgehen

In einer ersten Pilotstudie des entwickelten Fachwissenstest Quantenoptik diente die Methode des Lauten Denkens vorrangig zur Optimierung der Aufgabengüte und damit zur Verbesserung der Validität auf Item-Ebene. Dazu wurden $N = 8$ Schülerinnen bzw. Schüler der gymnasialen Oberstufe, die zuvor das Unterrichtskonzept erlebt haben, gebeten ihre Gedanken während der Auseinandersetzung mit den Test-Items zu verbalisieren. Die Gesprächsverläufe wurden aufgezeichnet und transkribiert.

Die Durchführung erfolgte mit jedem Teilnehmer bzw. jeder Teilnehmerin separat und die Gespräche wurden aufgezeichnet. Am Anfang stand eine Instruktion zum Lauten Denken, die in Anlehnung an [125, A-49] formuliert wurde, um eine standardisierte Durchführung der Methode sicherzustellen [173]. Diese wurde im Leitfaden festgehalten, der im Anhang D dieser Arbeit eingesehen werden kann. In Anlehnung an [137] folgte auf Phasen des lautenden Denkens eine stärker strukturierte Phase, um retrospektiv Gedanken(-prozesse) aufzugreifen zu können. Dabei konnten insbesondere zuvor offen gebliebene Aspekte bezüglich der Itemschwierigkeiten, der Itemrelevanz etc. geklärt werden (vgl. Abschnitt 5.5.5).

5.3. KATEGORIENSYSTEM UND AUSWERTEVERFAHREN



Abbildung 5.1: Die Phasen der Erhebung zum Lauten Denken in der Übersicht. Abbildung bereits publiziert in [13].

Durch die Bearbeitung der Testaufgaben durch die Probandinnen und Probanden sollten folgende Fragestellungen ganz wesentlich untersucht werden, deren Klärung letztlich zur Stützung der Annahmen 2-4 dienen soll, auf denen die intendierte Testwertinterpretation fußt (vgl. Kapitel 4):

- FF 1: Inwiefern sind die entwickelten Items für die Schülerinnen und Schüler der gymnasialen Oberstufe sprachlich verständlich formuliert?
- FF 2: Werden die inhaltlichen Barrieren der Items als schwierigkeiterzeugend empfunden?
- FF 3: Sind die entwickelten Distraktoren authentisch?
- FF 4: Welche Strategien nutzen die Schülerinnen und Schüler bei ihren Entscheidungsfindungsprozessen?

5.3 Kategoriensystem und Auswerteverfahren

Kategoriensystem: Zur Auswertung der Daten und Beurteilung der einzelnen Items wurden die folgenden Kategorien (entnommen aus [137]) genutzt:

1. *Verständlichkeit des Items*
 - (a) Wurde das Item wie intendiert umschrieben?
 - (b) Wurde die ins Item eingebrachte Barriere wahrgenommen?
2. *Kognitive Prozesse*

- (a) Wurde der Entscheidungs- bzw. Antwortfindungsprozess als komplex wahrgenommen?
- (b) Wurde die Hürde als schwierigkeiterzeugend wahrgenommen?
- (c) War ein eigener Entscheidungsprozess mit Begründung möglich?

3. *Eignung Antwortformat und Itemschwierigkeit*

- (a) Sind die Distraktoren authentisch und unterscheidbar?
- (b) Wie wird die Itemschwierigkeit empfunden?

Inwieweit diese Kategorien aus Sicht der jeweiligen Probanden für die einzelnen Items erfüllt sind, wurde mittels skalierender Inhaltsanalyse ausgewertet:

- *trifft zu* - zugeordneter Zahlenwert 1.0
- *trifft teils zu* - zugeordneter Zahlenwert 0.5
- *trifft nicht zu* - zugeordneter Zahlenwert 0.0

Kodierung und Ankerbeispiele: Zusammenfassende Aussagen zu den Inhalten des Items, den Antwortmöglichkeiten oder rückblickende Einordnungen ermöglichten die Bewertung der *Verständlichkeit des Items*. Trafen die Schülerinnen und Schüler Aussagen über ihren Antwortfindungsprozess, so wurden diese dem Selektionskriterium *Kognitive Prozesse* zugeordnet. Auf der oben beschriebenen 3-stufigen Skala wurde bewertet, ob der Entscheidungsprozess einem komplexen Denk- und Überlegungsprozess entsprach, ob die eingebaute Hürde als schwierigkeiterzeugend empfunden wurde und ob ein eigener Entscheidungsprozess mit Begründung möglich war. Die Analyse dieser kognitiven Prozesse ist zur Bewertung der Itemqualität entscheidend: wären die Entscheidungsprozesse beispielsweise durchgehend nicht komplex, so könnte dies etwa ein Indiz dafür sein, dass geraten wurde, dass das Item zu schwer ist oder unklar formuliert wurde. Eng damit verwandt ist daher die Kategorie *Eignung Antwortformat und Itemschwierigkeit*. Aussagen der Probandinnen und Probanden, die Aufschluss über die Qualität der Fragen und Antwortmöglichkeiten zuließen, wurden hier eingeordnet. Dabei wurde insbesondere in der Retrospektive oft explizit über die Authentizität bzw. die Unterscheidbarkeit der Distraktoren diskutiert.

Zu jeder Zuordnung wurde ein belegender Auszug aus dem Gespräch extrahiert, der die gewählte Kodierung rechtfertigt; diese sind dieser Arbeit mit der Daten-CD beigelegt. Die Beurteilung wurde für 12.5% der Daten von einem zweiten unabhängigen Kodierenden vorgenommen und die berechnete Beurteilerübereinstimmung lag bei $\kappa = 0.72$ (95% CI [0.58;0.85]).

Für jedes Item ergab sich durch die Bewertung in den einzelnen Kategorien eine Topographie über die Befragungskohorte hinweg.

5.4 Ergebnisse der „Laute Denken“-Erhebung

Wir berichten nachfolgend für jedes Item die Mittelwerte der jeweiligen Kategorien. Die jeweiligen Itemmittelwerte sind auf zwei Nachkommastellen gerundet und wie folgt farblich kodiert:

1. Mittelwert 0.00–0.33 wird gewertet als *trifft zu* und grün kodiert
2. Mittelwert 0.34–0.66 wird gewertet als *trifft teils zu* und gelb kodiert
3. Mittelwert 0.67–1.00 wird gewertet als *trifft nicht zu* und rot kodiert

Die so erhaltene Topographie ist für jedes Item in der nachfolgenden Tabelle dargestellt und ist von links nach rechts zu lesen (je Item). In Klammern ist für jedes Item in der ersten Spalte angegeben, an welcher Stelle es in der finalen Version des Tests steht. Items, in deren Zeilen sich rote Zellen häufen, müssen entweder grundlegend überarbeitet oder eliminiert werden. Allerdings sind auch solche Items aus dem Set eliminiert worden, die beispielsweise in der folgenden Pilotstudie schlechte statistische Kennwerte besaßen (vgl. Kapitel 6). Die Items 16 und 18 wurden nicht einbezogen, weil sie bereits vor der Laute-Denken-Studie aus inhaltlichen Gründen eliminiert und erst danach durch neue Items ersetzt wurden. Außerdem wurde Item 10 bereits vor Beginn der Laute Denken-Erhebung ersatzlos gestrichen. Die Items 13 und 14 (jetzt 7 und 8) wurden bei der Laute Denken-Erhebung nicht berücksichtigt, weil die jeweiligen Item-Inhalte bei der Konzeptdurchführung aus zeitökonomischen Gründen nicht behandelt und somit auch nicht gefragt werden konnten.

| Item früher (jetzt) | IIU | BW | EK | HS | EE | DA | DU | IS |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 (1) | 0,19 | 0,25 | 0,44 | 0,31 | 0,44 | 0,25 | 0,31 | 0,38 |
| 2 (raus) | 0,14 | 0,25 | 0,50 | 0,50 | 0,07 | 0,14 | 0,00 | 0,44 |
| 4 (3) | 0,19 | 0,19 | 0,13 | 0,13 | 0,31 | 0,13 | 0,06 | 0,31 |
| 5 (4) | 0,06 | 0,06 | 0,19 | 0,19 | 0,13 | 0,00 | 0,00 | 0,57 |
| 6 (5) | 0,00 | 0,43 | 0,29 | 0,43 | 0,14 | 0,00 | 0,06 | 0,43 |
| 7 (raus) | 0,13 | 0,13 | 0,31 | 0,19 | 0,00 | 0,25 | 0,00 | 0,31 |
| 8 (6) | 0,19 | 0,13 | 0,25 | 0,13 | 0,19 | 0,21 | 0,00 | 0,21 |
| 9 (raus) | 0,19 | 0,19 | 0,31 | 0,25 | 0,38 | 0,13 | 0,25 | 0,56 |
| 10 (raus) | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 11 (raus) | 0,00 | 0,19 | 0,44 | 0,25 | 0,13 | 0,14 | 0,00 | 0,57 |
| 12 (raus) | 0,06 | 0,31 | 0,56 | 0,63 | 0,13 | 0,25 | 0,06 | 0,81 |
| 13 (7) | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 14 (8) | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 15 (10) | 0,06 | 0,44 | 0,44 | 0,56 | 0,00 | 0,19 | 0,00 | 0,63 |
| 16 (ersetzt durch neue 11) | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 17 (raus) | 0,29 | 0,36 | 0,13 | 0,31 | 0,25 | 0,06 | 0,00 | 0,25 |
| 18 (ersetzt durch neue 12) | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 19 (raus) | 0,19 | 0,38 | 0,31 | 0,38 | 0,13 | 0,38 | 0,00 | 0,31 |
| 20 (raus) | 0,07 | 0,42 | 0,50 | 0,25 | 0,36 | 0,25 | 0,00 | 0,64 |
| 21 (13) | 0,00 | 0,43 | 0,81 | 0,88 | 0,00 | 0,31 | 0,06 | 0,75 |

Tabelle 5.1: Tabelle zu Ergebnissen der Laute-Denken-Studie. Die Selektionskriterien zu den drei Kategorien lauten: „Item wie intendiert umschrieben“ (IIU), „Barriere/Hürde des Items wahrgenommen“ (BW), „Entscheidungsprozess als komplex wahrgenommen“ (EK), „Hürde als schwierigkeiterzeugend empfunden“ (HS), „Eigener Entscheidungsprozess mit Begründung möglich“ (EE), „Distraktoren authentisch“ (DA), „Distraktoren unterscheidbar“ (DU), „Itemschwierigkeit angemessen“ (IS). Die Items in ihrer finalen Version finden sich im Test in Anhang C dieser Arbeit. Diese Ergebnistabelle ist bereits erschienen in [13].

5.5 Diskussion der Ergebnisse und Einblicke in die Itemrevision

5.5.1 Forschungsfrage 1: Verständlichkeit der Items

Zunächst ist positiv festzuhalten, dass die Itemmittelwerte in der Kategorie *Verständlichkeit des Items* mit den Selektionskriterien *Item wie intendiert umschrieben* (IIU) und *Barriere wahrgenommen* (BW) den Wert 0.44 nicht überschreiten. Bezüglich IIU sind sogar die Werte aller Items unterhalb von 0.30 und liegen damit im positiven Bereich. Dies spricht für die Formulierung der Itemstämme, die trotzdem punktuell in Rücksprache mit den Probandinnen und Probanden optimiert wurden, v.a. im Zusammenhang mit deren Auswirkungen auf die Distraktoren. Item 6 (in der endgültigen Fassung Item 5) wurde in diesem Kontext dahingehend verändert, dass ein Großteil der Formulierung der Distraktoren in den Itemstamm verschoben wurde, wodurch das Item insgesamt besser

verständlich wird.

Ein anderes Beispiel stellt Item 2 dar; auch hier wurden sprachliche Veränderungen vorgenommen. Das Item wurde aber in der Pilotstudie II (vgl. Kapitel 6) dennoch aufgrund schlechter statistischer Kennwerte entfernt.

5.5.2 Forschungsfrage 2: Schwierigkeitserzeugende Barrieren

Durch die Äußerungen in der Laute Denken-Erhebung konnten Indizien für die ablaufenden kognitiven Prozesse beim Beantworten der Items erfasst werden. Im Wesentlichen wurden die intendierten kognitiven Prozesse bei den Befragten beobachtet. Es fällt auf, dass der Entscheidungsprozess bei der Mehrzahl der Items als komplex empfunden wurde. Nur bei Item 21 werden in den Selektionskriterien *Entscheidungsprozess als komplex wahrgenommen* ($EK = 0.81$) und *Hürde als schwierigkeitserzeugend empfunden* ($HS = 0.88$) negative Werte festgestellt. Dies ist natürlich nicht erwünscht, denn ein wenig oder gar nicht komplexer Entscheidungsprozess spricht dafür, dass der Proband bzw. die Probandin durch Raten oder Ausschlussprinzip zu einer (mitunter richtigen) Lösung kam. Item 21 wurde demnach überarbeitet: Das Item 21 (in der endgültigen Fassung Item 13) lautete ursprünglich so: „Photonen sind...

- a) ...kugelförmige Teilchen, die manchmal wellenartiges Verhalten zeigen.
- b) ... kugelförmige Teilchen, die von einer Welle umgeben sind, die für die Interferenz verantwortlich ist.
- c) ... die elementare Energieportion von Licht.“

Einige der Probanden waren der Ansicht, dass vor allem die Dopplung des Ausdrucks „kugelförmige Teilchen“ in den Distraktoren a) und b) dazu führt, dass der Entscheidungsprozess wenig komplex ausfällt und auf Antwortmöglichkeit c) führt. In Rücksprache mit den Probanden wurde das Item abgewandelt zu: „Photonen sind...

- a) ...kugelförmige Teilchen, die manchmal wellenartiges Verhalten zeigen.
- b) ... Bestandteile des Lichts, die von einer Welle umgeben sind, die für die Interferenz verantwortlich ist.
- c) ... Energieportionen.“

und beibehalten, obwohl die Kennwerte auch über die Selektionskriterien hinweg am schlechtesten ausfielen, weil das Item inhaltlich große Relevanz besitzt.

Bei der überwiegenden Mehrheit der konzipierten Testaufgaben wurde von den Schülerinnen und Schülern die Antwortfindung fachlich korrekt begründet (Werte $EE \leq 0,56$). Die eingebauten Hürden werden mit der Ausnahme von Item 21 (jetzt 13) als mindestens einigermaßen schwierigkeitserzeugend empfunden.

5.5.3 Forschungsfrage 3: Authentische Distraktoren

Besonders wichtig aus Sicht der Fragebogenkonstruktion und später für die Validität der Testergebnisse sind die Kriterien *Distraktoren authentisch* und *Distraktoren unterscheidbar* (DA, DU) aus der Kategorie *Eignung Antwortformat und Itemschwierigkeit*. Dass diese allesamt niedrige Werte $DA \leq 0.38$ und $DU \leq 0.31$ vorweisen, spricht dafür, dass die Teilnehmerinnen und Teilnehmer diese als adäquat bewerteten. Zur weiteren Verbesserung wurden in der retrospektiven Diskussion der einzelnen Items dennoch Umformulierungen mit den Schülerinnen und Schülern diskutiert, sodass gerade für die Items mit grenzwertig hohen DA-Werten Veränderungen vorgenommen wurden, beispielsweise bei Item 1. Hier lautete die Aufgabenstellung zunächst: „Ein Strahlteiler...

- a) ...wird im Michelson-Interferometer verwendet, weil man damit einen einfallenden Lichtstrahl in zwei Teilstrahlen trennen kann.
- b) ...ist ein Prisma.
- c) ...trennt einfallende Lichtstrahlen in zwei Teilstrahlen oder überlagert zwei Lichtstrahlen zu einem.

Kritisiert wurde von den Probandinnen und Probanden oft Distraktor b), weil sich hier ein logischer Widerspruch durch Gleichsetzen von Strahlteiler und Prisma ergab; dieser Distraktor war also nicht authentisch. Dem entgegen steht mit Distraktor a) einer, der hochgradig authentisch ist, weil laut einiger Probandinnen und Probanden der Begriff Michelson-Interferometer sehr attraktiv wirkt. Gemeinsam mit den Befragten wurde das Item überarbeitet zu „Ein Strahlteiler...

- a) ...wird im Michelson-Interferometer verwendet, weil man damit einen einfallenden Lichtstrahl in zwei Teilstrahlen trennen kann.
- b) ...besteht aus zwei verkitteten Prismen, wobei eines für den durchgelassenen und eines für den reflektierten Strahl verantwortlich ist.
- c) ...trennt einfallende Lichtstrahlen oder überlagert zwei Lichtstrahlen.



Bei der Testkonstruktion in Kapitel 4.3.2.1 wurde zu Bedenken gegeben, dass die Forderung nach möglichst klar verständlichen, einfachen Formulierungen oft nur schwer gleichzeitig mit uneingeschränkter physikalischer Richtigkeit in Einklang zu bringen ist. Dieses Item ist ein Paradebeispiel für dieses Problem: Lichtstrahlen sind keine Objekte der Realität, sondern dienen als eine von verschiedenen Modellvorstellungen der Beschreibung von Licht. Weil der Strahlteilerwürfel im Unterricht des Erlanger Unterrichtskonzepts im Lichtstrahlmodell erläutert wird, wird in diesem Item auf diese Modellvorstellung rekurriert. Dabei ist klar, dass Lichtstrahlen nicht getrennt oder überlagert werden können, weil sie idealisierte Sichtverbindungen darstellen. Aber alternative Formulierungen, die den Modellierungscharakter berücksichtigen und physikalisch vollständig richtig sind, scheinen nur schwer noch in einem Satz als Antwortmöglichkeit in einem Multiple-Choice-Test dienen zu können.

5.5.4 Forschungsfrage 4: Strategien bei Entscheidungsprozessen

Durch das Laute Denken konnte festgestellt werden, dass die Schülerinnen und Schüler bei fehlendem Fachwissen auch andere Lösungsstrategien nutzen als inhaltlich-argumentative. Es zeigte sich, dass einige Schülerinnen und Schüler beim Fehlen des für die Beantwortung des Items notwendigen Wissens tendenziell für die Antworten entschieden, die im Vergleich zu den anderen Antwortmöglichkeiten sehr konkret formuliert war oder die einen Begriff enthielten, der auch im Itemstamm enthalten war. Auch unterschiedliche Distraktorenlängen nahmen einige Schülerinnen und Schüler in ihre Antwortfindung im Falle von Nicht-Wissen mit auf. Aufgrund dieser Erkenntnisse wurden nach der Auswertung aller Protokolle der erarbeiteten Items dahingehend geprüft, dass sämtliche Distraktoren in ähnlicher Weise formuliert waren, die sich semantisch und formal ähnelten und auf einem Abstraktionsniveau lagen (vgl. etwa den vorher-nachher-Vergleich des Items aus 5.5.3).

5.5.5 Ergebnisse der Nachbesprechung

In der Nachbesprechung wurde mit den Befragten die Gesamtheit der Items reflektiert. Dabei stand vor allem die Passung der Iteminhalte zu den Inhalten des Unterrichtskonzepts im Zentrum. Auch die Frage, ob die einzelnen Inhalte des Konzepts in einem angemessenen Verhältnis im Test abgebildet sind, wurde besprochen. In diesem Kontext zeigte sich, dass die Befragten die experimentierbezogenen Inhalte des Konzepts als unterrepräsentiert betrachteten. Um die Inhaltsvalidität des Testinstruments zu sichern, sind drei Items in Absprache mit den Schülerinnen und Schülern neu entstanden und wurden dem Item-Set für die Pilotstudie II hinzugefügt.



Dieses Vorgehen unterstreicht den Wert dieser Laute-Denken-Studie für die Inhaltsvalidität des Testinstruments. Im Übrigen bringt die Entwicklung neuer Items in Absprache mit den befragten Schülerinnen und Schülern einen entscheidenden Mehrwert: Schülerinnen und Schüler können selbst Distraktoren vorschlagen, die naturgemäß das Potential besitzen, auch von anderen Lernenden als attraktiv empfunden zu werden.

5.5. DISKUSSION DER ERGEBNISSE UND EINBLICKE IN DIE ITEMREVISION

Ein Schülervorschlag war es, ein Item hinzuzufügen, mit dem abgefragt werden kann, ob die getesteten Personen die Bedeutung der Koinzidenzmessung für Experimente mit einzelnen Photonen kennen. Das folgende Item wurde daher neu ergänzt: „Für jedes Einzelphotonenexperiment benötigt man...

- a) ...zwei Einzelphotonendetektoren.
- b) ...mindestens zwei Einzelphotonendetektoren.
- c) ...mindestens drei Einzelphotonendetektoren.

Antwort b) ist dabei richtig, weil man für Experimente mit angekündigten Photonen - wie hier im Konzept präsentiert - in jedem Fall zwei Detektoren benötigt, es aber auch Experimente gibt, in denen mehr Detektoren benötigt werden. Antwort c) ist daher offensichtlich falsch und Antwort a) auch.



Auch bei diesem Item mag man entgegenen, dass es ja noch andere experimentelle Aufbauten geben kann. Die Items dieses Testinstruments beziehen sich aber auf die Intervention mit dem Erlanger Unterrichtskonzept zur Quantenoptik. Mit diesem Item zeigen die Lernenden, ob sie die Notwendigkeit von Koinzidenzmessungen bei Experimenten mit angekündigten Photonen verstanden haben. Eine Allgemeingültigkeit im Sinne einer Übertragbarkeit auf alle denkbaren Einzelphotonenexperimente kann und muss nicht Anspruch des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik sein.

Eine Schülerin erinnerte zurecht daran, dass eine wichtige Erkenntnis aus der Betrachtung einzelner Photonen im Interferometer ist, dass Photonen die Eigenschaft Ort nicht permanent besitzen und regte an, ein entsprechendes Item zu ergänzen. Das folgende Item war das Ergebnis: „Man verwendet Interferometer in Einzelphotonenexperimenten, um...

- a) ...zu zeigen, dass Licht nicht aus Photonen besteht.
- b) ...zu zeigen, dass Photonen kein Weg zugeordnet werden kann.
- c) ...zu zeigen, dass Photonen Quanteneigenschaften besitzen.

Antwort b) ist richtig. Antwortmöglichkeit a) wurde inkludiert, weil an anderer Stelle im Rahmen des Unterrichts mit dem Erlanger Konzept die Vorstellung der Lernenden, Licht bestünde aus einem Strom von Photonen, diskutiert wurde, um stattdessen die Präparation eines Einzelphotonenzustands zu betonen. Antwortmöglichkeit c) soll von Lernenden als falsch erkannt werden, weil die Interferenz ein Wellenphänomen, aber keine Quanteneigenschaft ist.

Letztlich erwähnten mehrere der Probandinnen und Probanden, dass der nichtlineare Kristall in der beforschten Version des Testinstruments nicht angemessen berücksichtigt wurde. Mit mehreren Befragten wurden verschiedene denkbare Distraktoren diskutiert und letztlich entstand das folgende Item: „Wenn ein Laserstrahl auf den nichtlinearen Kristall fällt...

- a) ...kommt es zur Aussendung von Licht.
- b) ...kommt es zu einer Aufspaltung in zwei Teilstrahlen.
- c) ...kommt es zur Aussendung eines Beugungskegels mit Öffnungswinkel 3° .

Antwort a) ist hier richtig. Antwortmöglichkeit b) ist falsch, weil die parametrische Abwärtskonversion keine rein geometrische Angelegenheit ist. Die Schülerinnen und Schüler schlugen außerdem Antwortmöglichkeit c) als Distraktor vor: der Emissionskegel der emittierten Photonenpaare besitzt nämlich in der Tat einen Öffnungswinkel von 3° . Allerdings sind nicht Beugungseffekte Ursache dessen, sondern die Impulserhaltung, die durch Phasenanpassung erfüllt wird (vgl. Kapitel 2.4).

5.6 Zusammenfassung der Ergebnisse aus Pilotstudie I

Die Methode des Lauten Denkens ist zur Klärung der hier gestellten Forschungsfragen kritisch zu hinterfragen: einerseits kommen verschiedene Studien zum Einfluss des Verbalisierens auf die kognitiven Leistungen zu teils ambivalenten Ergebnissen [103], andererseits wird mit der hier vorgestellten Erhebung keine Verallgemeinerung von neuen Erkenntnissen verfolgt, sondern das Ziel ist die Weiterentwicklung eines Testinstruments.

Hier soll die Methode als ein erster Schritt in der Pilotierung des neu entwickelten Testinstruments zum deklarativen Wissen in Quantenoptik gelten. Die Kodierung auf der 3-stufigen Skala *trifft nicht zu - trifft teils zu - trifft zu* ist erstens grob und zweitens sind die Grenzen zwischen den vorgestellten Kategorien nicht scharf. Das muss bei der Interpretation der Ergebnisse an jeder Stelle mitbedacht werden. Die Ergebnisse ermöglichen aber, wie bereits beschrieben, die Darstellung einer Topographie hinsichtlich der drei ausgewerteten Kategorien. Letztlich führte diese, unter Hinzunahme einer genaueren inhaltlichen Analyse der Schüleräußerungen, auf eine sprachliche Überarbeitung aller Items und drei Items konnten neu generiert werden.

Die Laute-Denken-Erhebung führte damit zusammenfassend auf die Stützung der Annahmen 2-4, auf denen die intendierte Testwertinterpretation aus Kapitel 4 fußt. Diese werden also als erfüllt angenommen:

2. Die Items rufen bei Schülerinnen und Schüler intendierte kognitive Prozesse hervor, insbesondere sind richtige Antworten nicht (ausschließlich) auf Raten zurückzuführen. (vgl. Forschungsfragen 2 & 4)
3. Die Items werden wie intendiert verstanden. (vgl. Forschungsfrage 1)
4. Die Items und Distraktoren sind für die Schülerinnen und Schüler authentisch (vgl. Forschungsfrage 3).

KAPITEL 6

Pilotstudie II

Einordnung in den Kontext der Arbeit

Die Testgütekriterien, wie Objektivität, Reliabilität und Validität, dienen der Qualitätssicherung von Testinstrumenten. Aufschluss darüber, wie die entwickelten Items des Fachwissenstests Quantenoptik von den Probanden wahrgenommen werden und wie diese auf sie wirken, wurde mit der Methode des Lauten Denkens erforscht. Die zugehörigen Ergebnisse wurden im letzten Kapitel bereits diskutiert. In diesem Kapitel werden nun Argumente quantitativer Natur für die Erfüllung der Gütekriterien durch den Fachwissenstest zur Quantenoptik berichtet. Vorher werden allerdings die Ergebnisse einer ausführlichen Itemanalyse vorgestellt. Diese deskriptivanalytische Evaluation zu Itemschwierigkeiten und Trennschärfen ermöglichten eine tiefergehende Qualitätsbeurteilung des neuen Testinstruments. Eine Diskussion von Ergebnissen zum Lernzuwachs und zur Ankreuzsicherheit erlaubt einen optimistischen Blick auf die Hauptstudie ab Kapitel 7 und schließt den Entwicklungsprozess von Konzept und Testinstrument im Rahmen dieser Studie vorerst ab.

6.1 Ziele, Durchführung und Stichprobe

Die Pilotstudie II hat die empirische Erprobung des neu entwickelten Testinstruments zur Quantenoptik zum Ziel (vgl. Kapitel 4). Neben deskriptivanalytischen Analysen auf Itemebene liegt dabei der Fokus auf der Sammlung von Argumenten für eine valide Testwertinterpretation sowie die Reliabilität des Instruments. Erhebungsverfahren haben diesen Gütekriterien bekanntermaßen zu genügen, damit wissenschaftliche Ergebnisse aussagekräftig sind [141, S. 2f.].

Im Rahmen der Pilotstudie fand ein Unterricht des Erlanger Konzepts zur Quantenoptik statt. Die Intervention dauerte 4 Schulstunden und war daher vom gleichen Umfang und Ablauf, wie sie für die Hauptstudie vorgesehen war. Auf den Einsatz von Skalen zu affektiven Lernermerkmalen wurde aus Zeitgründen verzichtet und das Testinstrument zur Quantenoptik - im Rahmen der Pilotstudie noch bestehend aus 24 Items - wurde

6.1. ZIELE, DURCHFÜHRUNG UND STICHPROBE

nur zu zwei Erhebungszeitpunkten, nämlich vor (Prä) und nach der Intervention (Post) eingesetzt. Das verhindert eine Beurteilung eines nachhaltigen Lernzuwachses, wie sie in der Hauptstudie durch den Einsatz eines Follow-Up-Tests ermöglicht wird.

Die Intervention lief genau gleich ab, wie später in der Hauptstudie. Dies war ein entscheidendes Kriterium bei der Durchführung der Pilotstudie, um einen umfassenden Einblick in die grundlegende Realisierbarkeit der Intervention und die Qualität des Testinstruments zu erhalten. Die Akquise von Oberstufenkursen (11. / 12. Jahrgangsstufe) zur Teilnahme für die Hauptstudie zeichnete sich als schwer ab¹, sodass auf die Durchführung der Pilotstudie an Schulen verzichtet wurde, um eine Teilnahme der Schulen an der Hauptstudie nicht zu gefährden und den Pool der potentiell verfügbaren Schulen nicht einzuschränken. Die Pilotstudie wurde stattdessen mit $N = 100$ Studierenden der Ingenieurwissenschaften der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg durchgeführt, wobei 86 vollständige Prä-Posttestpaare vorliegen.

73 der Teilnehmer an der Pilotstudie waren männlich, 27 weiblich. Die letzten Zeugnisnoten Physik der Teilnehmenden wurde erhoben ($m = 2.10$, $SD = 0.98$). Vor der Intervention wurde außerdem das Interesse an Quantenphysik auf einer 6-stufigen Skala von *sehr interessiert* (= 1) bis *gar nicht interessiert* (= 6) abgefragt ($m = 2.36$, $SD = 1.13$) - diese Außenkriterien werden zur Untersuchung der Kriteriumsvalidität des Testinstruments genutzt (vgl. Kapitel 6.4.1).

Aufgrund der Erkenntnisse dieser Pilotstudie wurde für die finale Testversion letztlich ein Itemset bestehend aus 13 Items ausgewählt. Die nachfolgend berichteten Ergebnisse beziehen sich daher nur auf diese 13 für die Hauptstudie eingesetzten Items.

¹Dies ist kein Wunder, weil in der 11. Klasse die Quantenphysik nicht curricular verankert ist und die 12. Jahrgangsstufe verkürzt ist und mit dem Abitur endet.

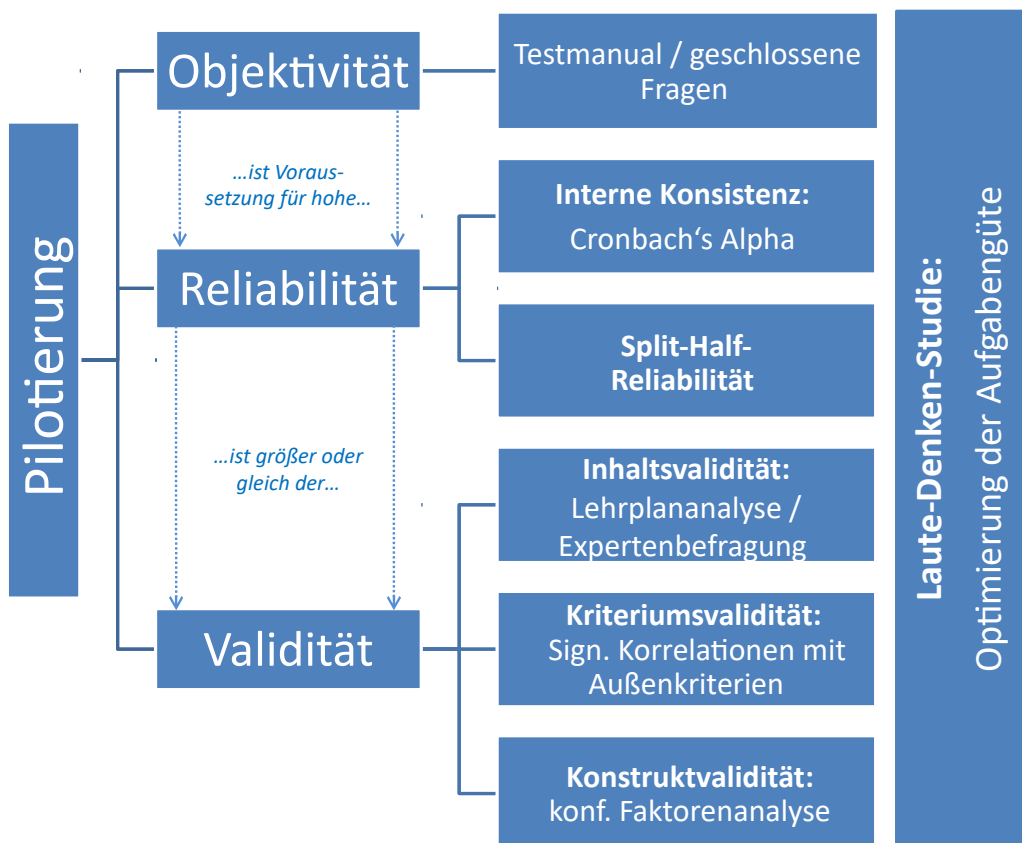


Abbildung 6.1: Darstellung der Gütekriterien, wie sie im Rahmen dieser Pilotstudie für das entwickelte Testinstrument zur Quantenoptik, abgesichert wurden. Die Objektivität ist dabei aufgrund des geschlossenen Aufgabenformats unkritisch. Auf die Reliabilität wird in Abschnitt 6.3 eingegangen, auf die Validität in Abschnitt 6.4. Im folgenden Abschnitt werden allerdings zunächst die Ergebnisse einer deskriptivanalytischen Itemanalyse vorgestellt (Abschnitt 6.2). Abbildung bereits publiziert in [13].

6.2 Ergebnisse der Itemanalyse

Der Datensatz der Pilotstudie besteht aus 86 vollständigen Prä-Posttestpaaren. Probanden von denen Prä- oder Posttest fehlt, wurden von der Auswertung ausgeschlossen.

Am Anfang der Itemanalyse steht ein Einblick in die Häufigkeitsverteilung der Antworten bei den einzelnen Items. Damit erhält man bereits einen Eindruck in die Qualität der Items und erkennt mögliche Boden- oder Deckeneffekte (vgl. Abbildung 6.2) [166, S. 264]. Die Analyse der Itemschwierigkeiten und Itemtrennschärfen ermöglicht eine Optimierung des Testinstruments.

6.2. ERGEBNISSE DER ITEMANALYSE

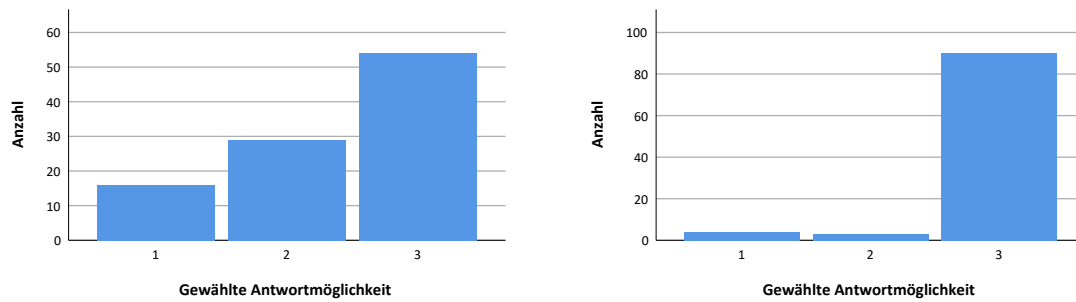


Abbildung 6.2: Balkendiagramme, die die Auswahlhäufigkeit unterschiedlicher Antwortmöglichkeiten (1, 2 und 3) zweier Items aus dem Posttest in der Pilotstudie zeigen. Links: ein Item mit hinreichender Varianz, wobei die richtige Antwortmöglichkeit (= 3) am häufigsten ausgewählt wurde. Items mit einer solchen Antwortverteilung sind potentiell dazu geeignet zwischen „guten“ und „schwächeren“ Schülerinnen und Schülern zu differenzieren. Rechts: Eine der drei Antwortmöglichkeit wird von fast allen Befragten angekreuzt. Dieses Item ist entweder zu leicht, falls die dritte Möglichkeit tatsächlich wahr ist, oder es ist zu schwer. In keinem Fall kann ein solches Item zwischen unterschiedlichen Leistungsgruppen differenzieren, es dient also nicht dem Ziel, das mit einem Fachwissenstest verfolgt wird. Die Aufgabe der in diesem Abschnitt berichteten Itemanalyse ist es, solche Probleme zu identifizieren, in psychometrischen Kennwerten (Itemschwierigkeit und Trennschärfe) zu quantifizieren und eine Überarbeitung oder den Ausschluss problematischer Items zu initiieren.

Die nachfolgend berichteten psychometrischen Kennwerte beziehen sich auf die Items, wie sie in der finalen Version des Testinstruments zu finden sind. Items, die in Folge der Itemanalyse aus dem Itemset genommen wurden, werden hier nicht dargelegt und diskutiert.

6.2.1 Itemschwierigkeit

Zwischen Schülerinnen und Schülern kann nur hinsichtlich ihres Leistungsniveaus differenziert werden - hier bezogen auf das deklarative Wissen zur Quantenoptik - wenn Items von diesen nicht per sé richtig oder falsch beantwortet werden, d.h. die Items dürfen nicht zu schwer und auch nicht zu leicht sein. Ein Maß für die Schwierigkeit eines Items ist sein Schwierigkeitsindex. Unter diesem Schwierigkeitsindex versteht man den Quotienten aus tatsächlich erreichter Punktsomme aller Befragten bei einem Item und der maximal zu erreichenden Punktsomme [141, S. 76]. Dieser Wert liegt zwischen 0 und 1 und wird manchmal noch mit 100 multipliziert. Im Fall dichotom kodierter Items - also solcher, die entweder richtig (= 1 Punkt) oder falsch (= 0 Punkte) sind - entspricht der Schwierigkeitsindex eines Items dem Anteil der Befragten, die das jeweilige Item richtig bearbeitet haben, also der Lösungswahrscheinlichkeit eines Items [50, S. 218]. Ein Schwierigkeitsindex nahe 1 (oder nahe 100) spricht daher für ein sehr leichtes, ein Schwierigkeitsindex nahe 0 für ein sehr schweres Item. Angestrebt wird ein großer Anteil von Items im mittleren Schwierigkeitsbereich: dadurch ermöglicht der Test eine Unterscheidung von Schülerinnen und Schülern mit verschiedenen Leistungsniveaus. Items mit

Itemschwierigkeiten zwischen 0.2 und 0.8 werden als geeignet angesehen; zur Beurteilung eines Tests als Ganzes wird auch die mittlere Itemschwierigkeit angegeben [50, S. 219].

In der hier berichteten Pilotstudie wurden die Itemschwierigkeiten für den Posttest ermittelt. Weil die Befragten keine Vorkenntnisse zur Quantenoptik hatten, wäre eine Einordnung der Schwierigkeitsindizes im Prätest nicht sinnvoll.

| <i>Itemschwierigkeiten</i> | |
|----------------------------|------------------------|
| | Item- schwierigkeit |
| Item 1 | ,15 |
| Item 2 | ,23 |
| Item 3 | ,51 |
| Item 4 | ,59 |
| Item 5 | ,73 |
| Item 6 | ,37 |
| Item 7 | ,74 |
| Item 8 | ,55 |
| Item 9 | ,17 |
| Item 10 | ,47 |
| Item 11 | ,35 |
| Item 12 | ,44 |
| Item 13 | ,63 |

Tabelle 6.1: Itemschwierigkeiten der 13 Items der finalen Testversion im Überblick, wie sie sich anhand der Pilotstichprobe ergaben. Die mittlere Itemschwierigkeit liegt bei 0.45.

Es zeigt sich, dass der Großteil der Items im mittleren Schwierigkeitsbereich liegt. Nur die Items 1 und 9 liegen im zu schwierigen Bereich. Die Items wurden dennoch beibehalten, weil sie inhaltlich wichtige Aspekte abfragen.

6.2.2 Trennschärfen

Sagt die Beantwortung eines Items durch einen Befragten sein Ergebnis im Gesamttest gut voraus, so spricht man in diesem Fall von einem trennscharfen Item.

Die Trennschärfe eines Items entspricht also einer Korrelation zwischen dem Itemwert eines Probanden oder einer Probandin und dem korrigierten Gesamttestwert [141, S. 84]. Beim korrigierten Gesamttestwert wird der Itemwert des Items vom Testscore subtrahiert, dessen Trennschärfe ermittelt werden soll. Sonst würde die Korrelation nämlich fälschlicherweise erhöht [50]. Typischerweise werden Trennschärfen zwischen 0.3 und 0.5 als mittelmäßig und über 0.5 als hoch betrachtet [60, 216].

6.3. ERGEBNISSE DER RELIABILITÄTSANALYSE

| <i>Trennschärfen</i> | | |
|----------------------|---------------|-------------------------------|
| | Trennschärfen | korrigiertes Cronbach's Alpha |
| Item 1 | ,40 | ,76 |
| Item 2 | ,39 | ,76 |
| Item 3 | ,54 | ,75 |
| Item 4 | ,45 | ,76 |
| Item 5 | ,40 | ,76 |
| Item 6 | ,32 | ,77 |
| Item 7 | ,37 | ,77 |
| Item 8 | ,40 | ,76 |
| Item 9 | ,31 | ,77 |
| Item 10 | ,50 | ,75 |
| Item 11 | ,36 | ,77 |
| Item 12 | ,31 | ,77 |
| Item 13 | ,48 | ,76 |

Tabelle 6.2: Trennschärfen der 13 Items der finalen Testversion im Überblick, wie sie sich anhand des Posttests für die Pilotstichprobe ergaben. Die mittlere Trennschärfe liegt bei 0.40. Die Diskussion über Cronbach's α als Maß für die interne Konstanz des Tests schließt sich im nächsten Kapitel 6.3 an.



In Abschnitt 6.2.1 wurde festgestellt, dass zu leichte oder zu schwere Items ungeeignet sind, um zwischen Personen mit unterschiedlichen Fähigkeitsausprägungen zu differenzieren. Dies hat zur Folge, dass zu schwere und zu leichte Items niedrige Trennschärfen vorweisen, während Items im mittleren Schwierigkeitsbereich die höchsten Trennschärfen haben [50, S. 220].

In den folgenden Abschnitten sollen Argumente für die Reliabilität des Tests, sowie für eine valide Testwertinterpretation auf Grundlage der Ergebnisse der Pilotstudie vorgestellt werden.

6.3 Ergebnisse der Reliabilitätsanalyse

Die Reliabilität wird als „Genauigkeit einer Messung verstanden“ [141, S. 120]. Im Sinne der hier angewandten klassischen Testtheorie² wird die Reliabilität verstanden als das

²„Die klassische Testtheorie (KTT) betrachtet ein Testergebnis unmittelbar als (messfehlerbehaftete) Merkmalsausprägung“ [50, S. 206]. Mittels probabilistischer Testtheorie könnte eine detailliertere Skalierung der Items vorgenommen werden und zwar unter Hinzunahme eines Zusammenhangs zwischen Personenfähigkeit und Itemschwierigkeit [183, S. 88]. Einen Überblick erhält man in Literatur zur quantitativer Forschung, z.B. [141, 50, 17].

Verhältnis zwischen der Varianz der idealen Werte (ohne Messfehler) und der Varianz der erhobenen Werte [141, S. 121]. Es gibt unterschiedliche Methoden zur Sicherung der Reliabilität eines Instruments, wobei hier die Interne Konsistenz mit Cronbach's Alpha und die Splithalf-Reliabilität berichtet werden.

6.3.1 Interne Konsistenz

Cronbach's α ist ein Maß für die interne Konsistenz einer Skala. α ist desto größer, je „höher die Korrelationen zwischen den Items im Durchschnitt sind“ [174]:

$$\alpha = \frac{N \cdot r_m}{1 + (N - 1) r_m},$$

wobei N die Zahl der Items eines Tests und r_m die mittlere Interkorrelation aller Items bezeichnet. Obwohl für gute Tests sehr hohe Werte für α verlangt werden - Werte für $\alpha \geq .90$ werden als hoch bezeichnet [216, 50, S. 199] - sind gerade für fachdidaktische Leistungstests oft keine hohen α -Werte zu erwarten [174]. Dies liegt daran, dass oft solche Konstrukte erfasst werden, die inhaltlich sehr weit gefasst und damit schwer zu operationalisieren sind (ebd.), d.h. Items korrelieren nicht notwendig stark miteinander. Niedrige Reliabilitätswerte verhindern aber den Einsatz eines entsprechenden Instruments zur Evaluation eines Konzepts nicht, sie sind nur nicht zur Erfassung eines zusammenhängenden Fähigkeitskonstrukts geeignet. Stattdessen können sie aber sehr wohl zur Überprüfung von Lernzielen genutzt werden (ebd.).

Für den hier pilotierten Fachwissenstest ergibt sich entsprechend die Erwartung eines nicht zu hohen α -Werts, weil...

1. ...die Items das breite Konstrukt „Quantenoptik“ abbilden sollen und damit nicht zu erwarten ist, dass die mittlere Interkorrelation der Items sehr hoch ist.
2. ... α bei gleicher Interkorrelation der Items für kleinere Itemzahl N auch kleiner wird. Aufgrund von gerade einmal 13 Testitems in der finalen Version, wird das also auch einen Einfluss auf die interne Konsistenz der Skala haben.

Für die Pilotstudie erhalten wir $\alpha = 0.78$ [11]. Dieser Wert kann vor dem Hintergrund der vorherigen Ableitungen als gut angesehen werden.

6.3.2 Splithalf-Reliabilität

Der Schätzung der Splithalf-Reliabilität liegt die Idee zugrunde, die Items eines Tests in zwei Testhälften aufzuteilen und die Korrelation zwischen diesen beiden Testhälften zu ermitteln [141, S. 128]. Die Spearman-Brown-Korrektur korrigiert die Reliabilität durch eine Aufwertung der Korrelation zwischen den beiden Testhälften auf die gesamte Testlänge (ebd.); ohne diese Korrektur würde die Reliabilität unterschätzt.

Für den Fachwissenstest „Quantenoptik“ ergibt sich eine Split-Half-Reliabilität von 0.75, sodass das Ergebnis der Reliabilitätsanalyse mit Cronbach's Alpha aus dem vorherigen Abschnitt bestätigt wird. Der Guttman's Split-Half-Koeffizient beträgt aufgerundet ebenfalls 0.75.

6.3. ERGEBNISSE DER RELIABILITÄTSANALYSE

Nachdem nun die Reliabilität für das entwickelte Testinstrument untermauert wurde, werden im folgenden Abschnitt verschiedene Argumente für eine valide Testwertinterpretation vorgestellt. Eine (ausreichend) hohe Reliabilität alleine macht einen Test noch nicht nützlich: er könnte zwar ein genaues Messinstrument sein, aber es wäre denkbar, dass das, was mit dem Test erhoben wird, etwas anderes ist, als intendiert.

6.4 Validität

In Kapitel 4.3.2.3 wurde die intendierte Testwertinterpretation festgehalten. Das Testergebnis im Fachwissenstest Quantenoptik soll ein Maß für das deklarative Wissen der Schülerinnen und Schüler im Bereich der Quantenoptik sein, wie es durch das Erlanger Unterrichtskonzept vermittelt wird. Diese intendierte Testwertinterpretation wurde auf sechs Annahmen gestützt. Im Zuge der Pilotstudien I und II (vgl. Kapitel 5 und 6) wurde die Gültigkeit dieser Annahmen überprüft. Die entsprechenden Ergebnisse werden in diesem Abschnitt berichtet; zum Teil stützen auch bereits die Ergebnisse aus der in Kapitel 5 dargestellten Laute-Denken-Studie die intendierte Testwertinterpretation (vgl. Kapitel 5.6).

Die zentralen Aspekte der Validität sind die Inhaltsvalidität, die Kriteriumsvalidität und die Konstruktvalidität [50, S. 200]:

- Inhaltsvalidität kann als gegeben angesehen werden, wenn ein Test das zu erhebende Konstrukt inhaltlich umfassend durch seine Items abdeckt [50].
- Kriteriumsvalidität kann als eine Korrelation ausgedrückt werden zwischen dem Testscore und einem bestimmten Außenkriterium, z.B. der Physiknote.
- Konstruktvalidität wird gesichert, indem Hypothesen, die sich aus dem Zielkonstrukt folgern lassen, mit Hilfe der Testergebnisse bestätigt werden.



Beispiel „Validierung“: Um Argumente für eine valide Testwertinterpretation zu sammeln, müssen verschiedene Methoden eingesetzt werden. Will man beispielsweise einen Rechentest für Grundschüler der 4. Jahrgangsstufe „validieren“, so könnte man...

1. die Inhaltsvalidität sichern, indem erfahrene Lehrkräfte den Test sondieren und daraufhin begutachten, dass alle wichtigen Rechenfertigkeiten im Test angemessen abgeprüft werden. Ein solches Verfahren wird als Expertenbefragung bezeichnet.
2. die Kriteriumsvalidität überprüfen, indem die Korrelation zwischen dem Testergebnis im neu entwickelten Rechentest und der vorherigen Mathematiknote der Schülerinnen und Schüler berechnet wird. Man erwartet hier hohe Korrelationen (konvergente Validität), während die Korrelation zwischen dem Testergebnis im Rechentest und der Sportnote nahe 0 sein sollte (diskriminante Validität).
3. die Konstruktvalidität prüfen, indem ein dem Test zugrundeliegendes Modell von Rechenfertigkeiten für Schülerinnen und Schüler mit Hilfe der Testergebnisse bestätigt wird, z.B. mittels konfirmatorischer Faktorenanalysen.

6.4. VALIDITÄT

Die nachfolgende Tabelle zeigt in zusammengefasster Form, welcher Validitätsaspekt in dieser Pilotstudie mit welcher Maßnahme adressiert wird und welche Annahme zur intendierten Testwertinterpretation aus Kapitel 4.3.2.4 damit jeweils gestützt wird:

| Annahme | Validitätsaspekt | Maßnahme |
|---|---|--|
| 1. Die Items bilden das Konstrukt Quantenoptik gemäß dem Strukturmodell aus Abb. 4.4 angemessen ab. | Konstruktvalidität, Inhaltsvalidität | Konfirmatorische Faktorenanalyse (vgl. Kapitel 6.4.2), Expertenbefragung (vgl. Kapitel 6.4.3) |
| 2. Die Items rufen bei Schülerinnen und Schülern intendierte kognitive Prozesse hervor, insbesondere sind richtige Antworten nicht (ausschließlich) auf Raten zurückzuführen. | Inhaltsvalidität (auf Itemebene) | Lautes Denken (vgl. Kapitel 5) |
| 3. Die Items werden wie intendiert verstanden. | Inhaltsvalidität (auf Itemebene) | Lautes Denken (vgl. Kapitel 5) |
| 4. Die Items und Distraktoren sind für die Schülerinnen und Schüler authentisch. | Inhaltsvalidität (auf Itemebene) | Lautes Denken (vgl. Kapitel 5) |
| 5. Die intendierten Teilkonstrukte werden angemessen durch die jeweiligen Skalen abgebildet. | Inhaltsvalidität | Expertenbefragung (vgl. Kapitel 6.4.3) |
| 6. Das Konstrukt „Quantenoptik“ wird durch den Test zu anderen oder ähnlichen Konstrukten abgrenzbar. | Kriteriumsvalidität | Korrelationsanalysen (vgl. Kapitel 6.4.1) |

Tabelle 6.3: Die Annahmen auf denen die intendierte Testwertinterpretation fußt, werden durch unterschiedliche Maßnahmen überprüft und argumentativ gestützt. Erst die Summe der Argumente spricht letztlich für eine valide Testwertinterpretation.

6.4.1 Kriteriumsvalidität: Korrelationsanalyse

Zur Überprüfung der Kriteriumsvalidität wurden zwei Außenkriterien erhoben:

1. Die letzten beiden Zeugnisnoten in Physik. Diese wurden zu einer Physiknote gemittelt.
2. Das Interesse der Befragten an Quantenphysik auf einer 6-stufigen Ratingskala (1 = sehr interessiert bis 6 = gar nicht interessiert).

In beiden Fällen wird eine hohe (und signifikante) Korrelation [78] mit dem Testscore erwartet, die sich auch zeigt:

| | Physiknote | Interesse an Quantenphysik |
|-----------|------------|-------------------------------|
| Testscore | 0.44** | 0.39** |

Tabelle 6.4: Korrelationen des Testscores im Posttest mit den Außenkriterien *Physiknote* und *Interesse an Quantenphysik* berechnet für die Stichprobe der Pilotstudie.

6.4.2 Konstruktvalidität: Konfirmatorische Faktorenanalyse

Mittels einer konfirmatorischen Faktorenanalyse kann überprüft werden, ob „eine hinreichende Übereinstimmung (Modellfit) zwischen den empirischen Daten und dem theoretischen Modell besteht“ [141, S. 334]. Die empirischen Daten sind hier die im Rahmen der Pilotstudie erhobenen Testwerte im Posttest. Das theoretische Modell, dessen Passung zu den Daten überprüft werden soll, ist hier das zugrunde liegende Strukturmodell *Quantenoptik* (vgl. Abbildung 4.4) bestehend aus den drei Faktoren *Theoretische Aspekte*, *Photonen* und *Einzelphotonen-Experimente*. Diese Substruktur des Tests soll sich auch empirisch anhand der Daten bestätigen lassen.

6.4. VALIDITÄT

| Faktor | Beispielitem |
|-----------------------------------|--|
| Theoretische Aspekte | <p>Unter Interferenz versteht man...</p> <ul style="list-style-type: none">▪ ...im Allgemeinen die Überlagerung von mindestens zwei elektromagnetischen Wellen.▪ ... im Allgemeinen die Überlagerung von genau zwei Wellen.▪ ...im Allgemeinen die Überlagerung von mindestens zwei Wellen. |
| Photonen | <p>Photonen sind...</p> <ul style="list-style-type: none">▪ ...kugelförmige Teilchen, die manchmal wellenartiges Verhalten zeigen.▪ ...Bestandteile des Lichts, die von einer Welle umgeben sind, die für die Interferenz verantwortlich ist.▪ ...Energieportionen. |
| Einzelphotonen-Experimente | <p>Man verwendet Interferometer in Einzelphotonen-Experimenten, um...</p> <ul style="list-style-type: none">▪ ...zu zeigen, dass Licht nicht aus Photonen besteht.▪ ...zu zeigen, dass Photonen kein Weg zugeordnet werden kann.▪ ...zu zeigen, dass Photonen Quanteneigenschaften besitzen. |

Abbildung 6.3: Modellspezifikation: Dem Modell liegen drei Faktoren zugrunde. Die Items 1, 4, 5, 7 und 8 bilden den Faktor „Theoretische Aspekte“, die Items 3, 10 und 13 den Faktor „Photonen“ und die Items 2, 6, 9, 11 und 12 den Faktor „Einzelphotonenexperimente“. Die genauen Itemformulierungen aller Items finden sich in der finalen Testversion in Anhang C.

Die Schätzung der Modellparameter erfolgte mit der Maximum-Likelihood-Methode und die Anpassungsgüte des Modellfits wurde mit Hilfe unterschiedlicher Gütemaßstäbe vorgenommen (vgl. Tab. 6.5).



Beurteilung des Modelfits. [141, S. 338] schlagen vor, welche Fit-Parameter zur Beurteilung der Anpassungsgüte des Modelfits herangezogen werden sollten und nennen zu erreichende Werte:

| Fit-Maß | Guter Fit | Akzeptabler Fit |
|--------------|-------------|-----------------|
| χ^2/df | 0.00 – 2.00 | 2.01 – 3.00 |
| <i>RMSEA</i> | 0.00 – 0.05 | 0.051 – 0.08 |
| <i>CFI</i> | 0.97 – 1.00 | 0.95 – 0.969 |
| <i>SRMR</i> | 0.00 – 0.05 | 0.051 – 0.100 |

Tabelle 6.5: Überblick über Fit-Maße und ihre zu erreichenden Werte für gute und akzeptable Modelfits, nach [141, 176, S. 338]. Einen detaillierten Überblick über die einzelnen Fit-Maße und ihre Berechnung liest man in Ref. [176] nach.

Für das hier zugrunde gelegte Modell zeigten sich die folgenden Modelfits, die für eine akzeptable bis gute Anpassungsgüte an die empirischen Daten sprechen:

| | χ^2/df | <i>RMSEA</i> | <i>CFI</i> | <i>SRMR</i> |
|-------------------------------|-------------|--------------|------------|-------------|
| 1-Fakt. Modell | 0.86 | 0.00 | 1.00 | 0.06 |
| 3-Fakt. Modell „Quantenoptik“ | 0.82 | 0.00 | 1.00 | 0.06 |

Abbildung 6.4: Fit-Maße der konfirmatorischen Faktorenanalyse auf Grundlage der empirischen Daten aus dem Posttest der Pilotstudie. Für das einfaktorielle Modell erhält man ferner $AIC = 107.62$, für das Dreifaktorielle $AIC = 108.79$. Aus inhaltlichen Gründen wird mit dem dreifaktoriellen Modell weitergearbeitet.

In der Pilotstudie zeigte sich, dass die Reliabilitäten der einzelnen Skalen aus test-theoretischer Sicht nicht zufriedenstellend sind:

- Skala „Theoretische Aspekte“ - 5 Items - $\alpha = 0.68$
- Skala „Einzelphotonenexperimente“ - 5 Items - $\alpha = 0.52$
- Skala „Photonen“ - 3 Items - $\alpha = 0.55$

Die Skalen werden aber trotzdem genutzt, weil...

- ...die Skalen sehr kurz sind, sodass niedrige Werte für Cronbach's Alpha zunächst keine große Überraschung sind (vgl. Kapitel 6.3.1)
- ...mit den Skalen nicht auf abgrenzbare Fähigkeitskonstrukte geschlossen werden soll, sondern weil sie einen Einblick verschaffen sollen, in welchen Bereichen durch das Erlanger Unterrichtskonzept zur Quantenoptik bei den Schülerinnen und Schülern besondere Lernzuwächse initiiert werden.

6.4.3 Inhaltsvalidität: Expertenbefragung³

Mit dem Begriff der Inhaltsvalidität wird zum Ausdruck gebracht, „inwieweit die Inhalte eines Tests bzw. der Items, aus denen er zusammengesetzt ist, tatsächlich das interessierende Merkmal erfassen“ [75, S. 148]. Die Inhaltsvalidität hängt daher ganz wesentlich mit der Konstruktvalidität zusammen [93]. Die Inhaltsvalidität kann dabei gleichermaßen auf einzelne Items eines Tests oder auf den Test als Ganzes bezogen sein:

| Testebene | Itemebene |
|--|--|
| Stellen die Items eine repräsentative Auswahl der interessierenden Gesamtheit möglicher Items dar? | Repräsentiert das Item den intendierten Inhalt? [91] |
| Sind alle relevanten Inhalte vorhanden? | Ist das Item Teil der interessierenden Grundgesamtheit möglicher Items? |
| Stehen die Inhalte in einem angemessenen Verhältnis zueinander? | Kann das Item als beispielhaft für diese Grundgesamtheit angesehen werden? |
| Sind keine Inhalte enthalten, die sich auf etwas Irrelevantes beziehen? | |

Tabelle 6.6: Fragen zur Inhaltsvalidität auf Ebene des Test als Ganzes und auf der Ebene einzelner Items nach [75, S. 152].

Die Klärung solcher oder ähnlicher Fragen gelingt üblicherweise mittels einer Expertenbefragung [91].

Verfahren der Gewinnung von Experten und Stichprobe: Gemeinsam mit einem Anschreiben wurde das Testinstrument in der finalen Version (13 Items, siehe Anhang C) an ausgewiesene Expertinnen und Experten zur Didaktik der Quantenphysik, darunter Professorinnen und Professoren, Postdocs sowie Doktorandinnen und Doktoranden verschickt, um eine möglichst heterogene Expertengruppe sicherzustellen. Den Expertinnen und Experten wurde das Arbeitsmaterial aus dem Erlanger Unterrichtskonzept zur Quantenphysik zur Verfügung gestellt, damit die zu erhebende Zieldomäne Quantenoptik möglichst transparent für die Expertinnen und Experten war. Das Anschreiben und der Expertenfragebogen können in Anhang E dieser Arbeit eingesehen werden.

Insgesamt nahmen $N = 8$ Expertinnen und Experten an der Befragung teil. Diese standen in keiner direkten oder indirekten Beziehung mit dem Forschungsprojekt.

³Die Ergebnisse dieses Kapitels wurden bereits veröffentlicht in [13].

Methodische Anmerkungen: Der Fragebogen für die Expertenbefragung beinhaltet die 13 Items der finalen Testversion. Zu jeder der 13 Testaufgaben gehörte eine Batterie von Items mit fünfstufiger Ratingskala⁴ - mit Hilfe dieser konnten die Experten die Items bewerten. Dies machte eine Beurteilung der Inhaltsvalidität auf Itemebene im Sinne von Tabelle 6.7 möglich:

| Inhaltsvalidität auf Itemebene | Items im Fragebogen zur Expertenbefragung |
|--|--|
| Repräsentiert das Item den intendierten Inhalt? [91] | 1. Der Inhalt dieses Items ist relevant für den Unterricht der Quantenoptik. |
| Ist das Item Teil der interessierenden Grundgesamtheit möglicher Items? | 2. Dieses Item prüft einen entscheidenden Inhaltsaspekt des Unterrichtskonzepts. |
| Kann das Item als beispielhaft für diese Grundgesamtheit angesehen werden? | 3. Die Distraktoren sind authentisch; könnten also von jemandem, der die Antwort nicht sicher kennt, als wahr vermutet werden. |
| | 4. Dieses Item ist gelungen. |

Tabelle 6.7: Items (fünfstufige Ratingskala) im Fragebogen zur Expertenbefragung zur Beurteilung der Inhaltsvalidität auf Itemebene.

Außerdem schließt sich am Ende des Fragebogens noch eine Skala aus vier Items zum Testinstrument als Ganzes an, wieder mit fünfstufiger Ratingskala. Diese diente der Beurteilung der Inhaltsvalidität auf Testebene im Sinne von Tabelle 6.7:

| Skala „Inhaltsvalidität des Testinstruments als Ganzes“ |
|--|
| 1. Die Items stellen relevante Inhalte des Unterrichtskonzepts dar. |
| 2. Die Inhalte stehen in einem angemessenen Verhältnis zueinander, d.h. die Gewichtung der Inhaltsbereiche ist sinnvoll. |
| 3. Das Testinstrument besitzt eine hohe Passung zum entwickelten Unterrichtskonzept und den damit vermittelten Inhalten. |
| 4. Das Testinstrument deckt wichtige Inhaltsaspekte der Einzelphotonenexperimente ab. |

Tabelle 6.8: Skala zur Inhaltsvalidität des Test als Ganzes. Die interne Konsistenz der Skala ergibt sich anhand der Stichprobe aus der Expertenbefragung zu $\alpha = 0.86$.

Wie bei [167] empfohlen, wurde zur Auswertung der Expertenbefragung auf sog. Diverging Stacked Bar Charts zurückgegriffen. Dabei wird ein Balken, der 100% der Expertenratings entspricht, so relativ zu Skalenmitte (0%) ausgerichtet, dass Zustimmung einem Ausschlag des Balkens nach rechts und Ablehnung einem Ausschlag des Balkens

⁴1 = trifft gar nicht zu, ..., 5 = trifft völlig zu

6.4. VALIDITÄT

nach links entspricht [214, S. 52]. Um die Expertenratings zu quantifizieren, wird zusätzlich der Mittelwert der Expertenratings eingeblendet.

Die Anmerkungen und Kommentare der Expertinnen und Experten wurde nicht kriteriengeleitet ausgewertet, sondern dienten stattdessen der internen Diskussion über einzelne Items. Zwar gab es Anmerkungen zu inhaltlichen und sprachlichen Aspekten einzelner Items, allerdings zeigte sich kein Bedarf zur Überarbeitung der Items.

Die quantitativen Ergebnisse der Expertenratings werden im folgenden Abschnitt im Überblick dargestellt und schließen die Pilotierung des Testinstruments ab.

Ergebnisse der Expertenbefragung: Die folgenden Diverging Stacked Bar Charts (erstellt mit der Software Tableau, 2019.3) beziehen sich auf die Prüfung der Inhaltsvalidität auf Itemebene: Es zeigt sich, dass ein großer Konsens darüber besteht, dass alle Items des Fachwissenstests relevante Inhalte zur Quantenoptik abfragen.

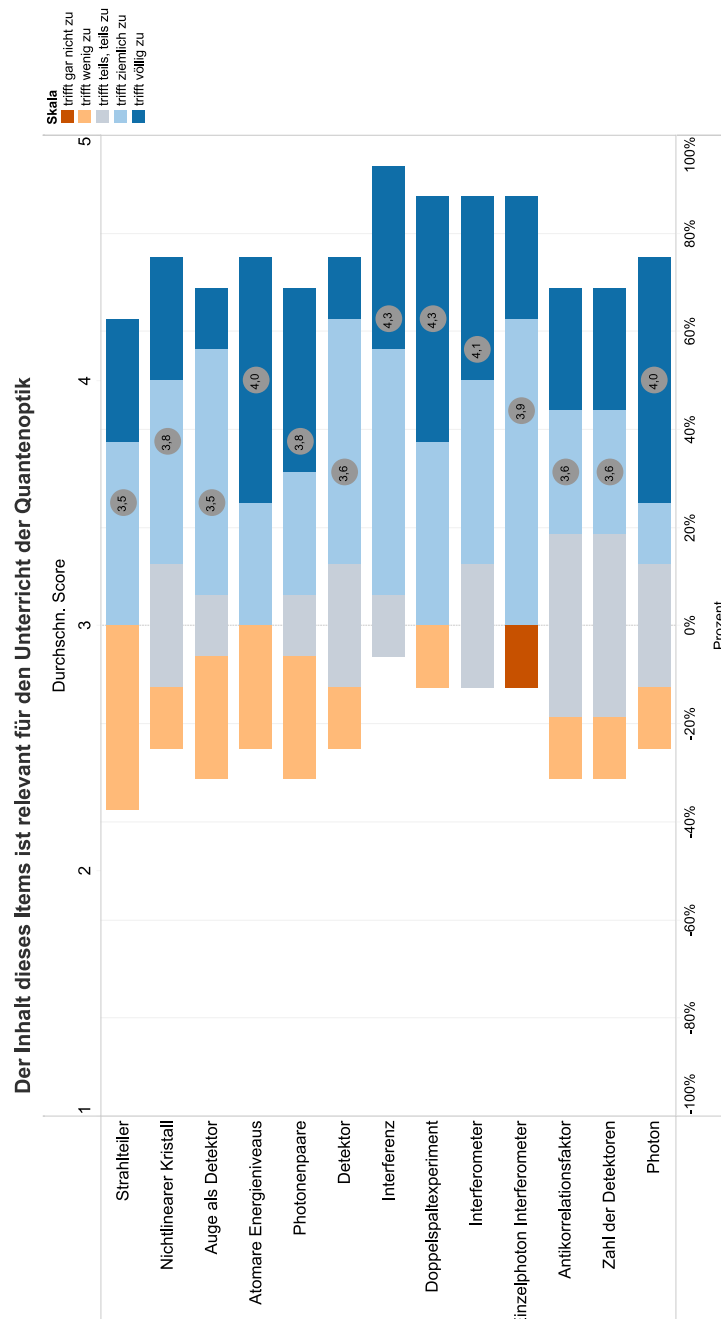


Abbildung 6.5: Diverging Stacked Bar Chart zur Aussage „Der Inhalt dieses Items ist relevant für den Unterricht der Quantenoptik“. Dargestellt sind die Ergebnisse der Expertenbefragung für jedes Item der finalen Testversion, wobei die Items nicht nummeriert, sondern nach Inhaltsschwerpunkt benannt sind. Die Reihenfolge stimmt mit der in der finalen Testversion aber überein (von oben nach unten). Abbildung bereits publiziert in [13].

6.4. VALIDITÄT

Nicht nur im Bezug auf die Quantenoptik alleine, sondern insbesondere im Bezug auf die Passung der Testitems zum Erlanger Unterrichtskonzept zur Quantenoptik, zeigte sich ein klares Bild. Die Expertinnen und Experten bescheinigen den einzelnen Items hohe inhaltliche Relevanz für Inhaltsaspekte des Unterrichtskonzepts:

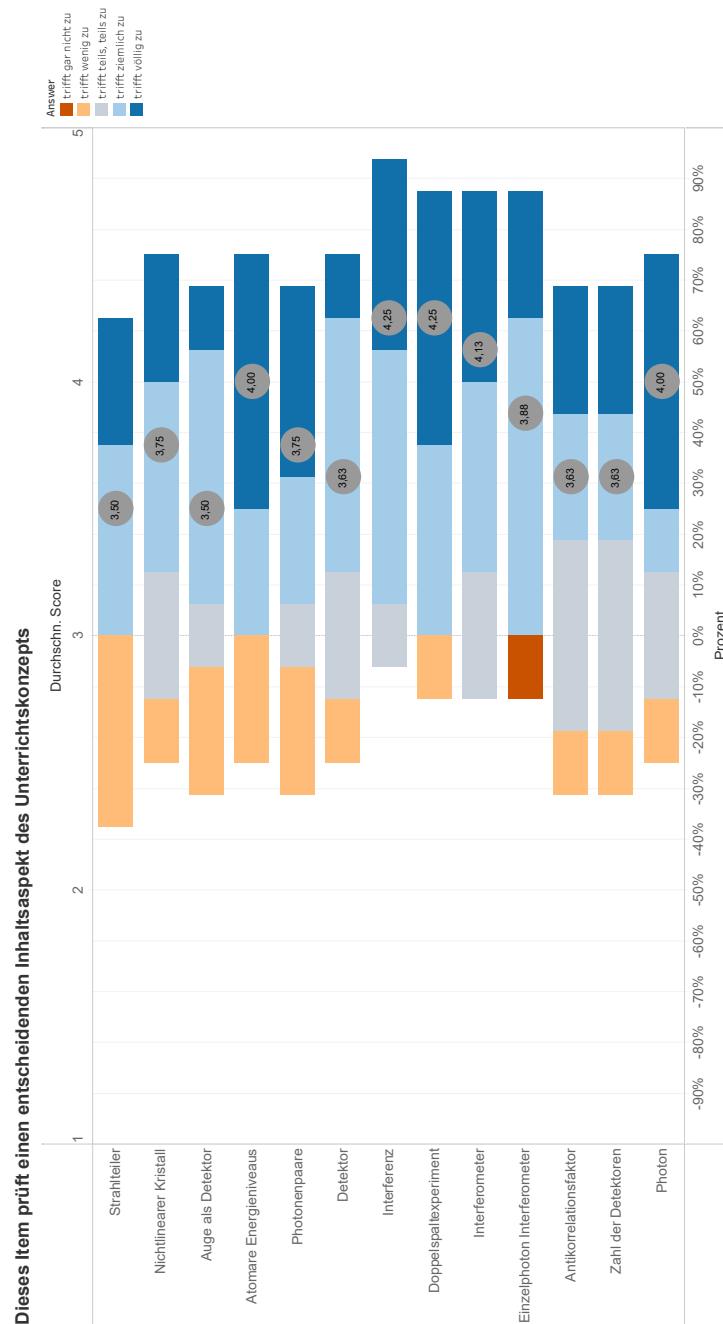


Abbildung 6.6: Diverging Stacked Bar Chart zur Aussage „Dieses Item prüft einen entscheidenden Inhaltsaspekt des Unterrichtskonzepts“.

Nicht nur die Items an sich, sondern auch die Antwortmöglichkeiten wurden inhaltlich validiert. So sollte abgesichert werden, dass diese inhaltlich sinnvolle Varianten darstellen. Auch darüber herrscht zwischen den befragten Expertinnen und Experten überwiegend Einigkeit:

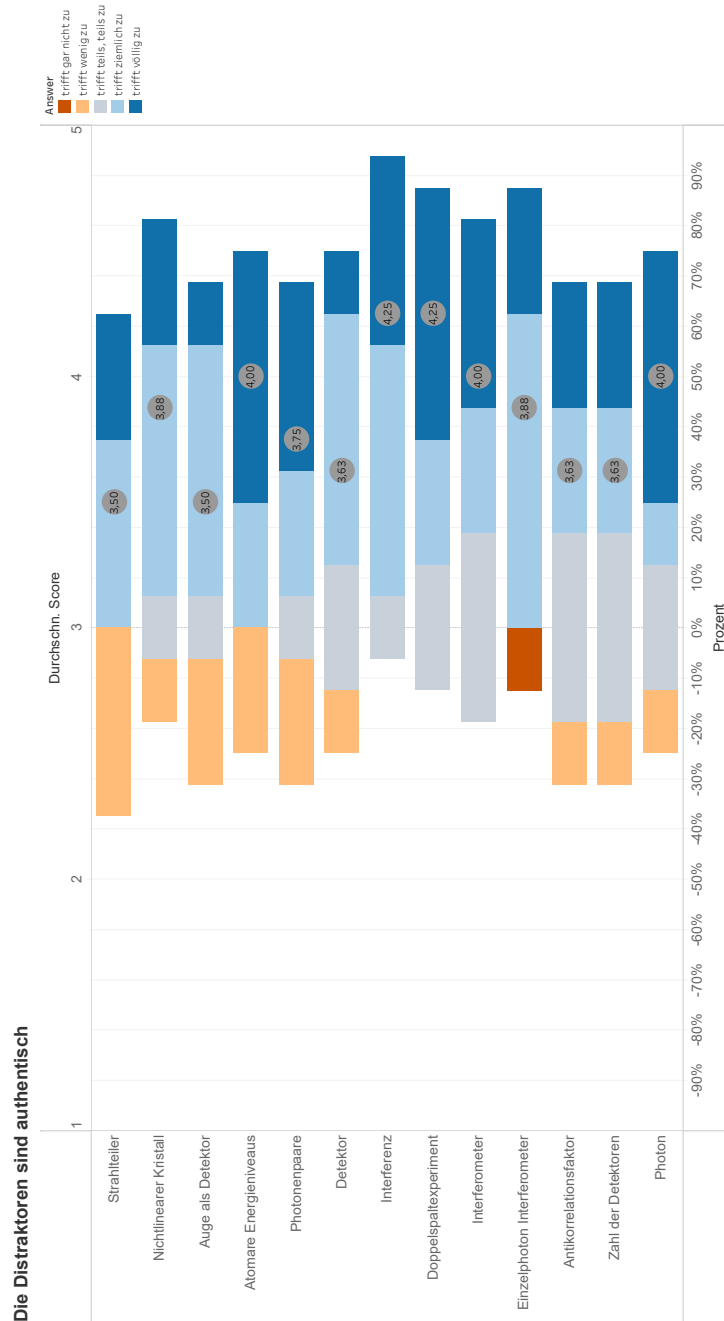


Abbildung 6.7: Diverging Stacked Bar Chart zur Aussage „Die Distraktoren sind authentisch; könnten also von jemandem, der die Antwort nicht sicher kennt, als wahr vermutet werden“.

6.4. VALIDITÄT

Abschließend folgte noch eine Bewertung der Qualität der einzelnen Items. Das Ergebnis zeigt, dass zwei der Items von den Expertinnen und Experten kritisch beäugt werden. Die beiden Items wurden dennoch aus didaktischen Gründen beibehalten, um die inhaltliche Breite zu erhalten.

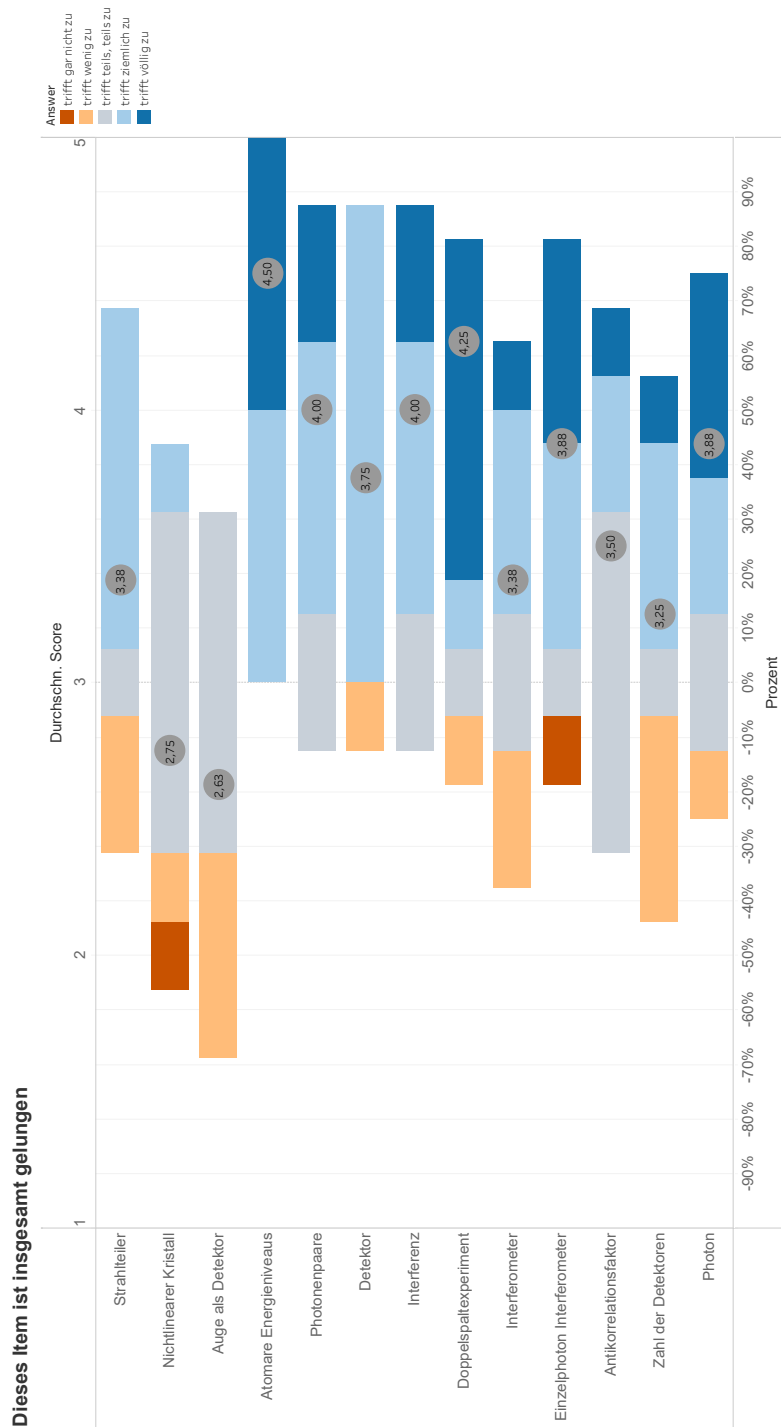


Abbildung 6.8: Diverging Stacked Bar Chart zur Aussage „Dieses Item ist gelungen“.

Betrachtet man abschließend die Skala zur Inhaltsvalidität des Testinstruments als Ganzes, so zeichnet sich ein durchweg positives Bild. Die Ergebnisse der Expertenbefragung unterstreichen sehr deutlich: Insgesamt kann die Inhaltsvalidität auf Grundlage der Vielfalt an Argumenten als gesichert angesehen werden.

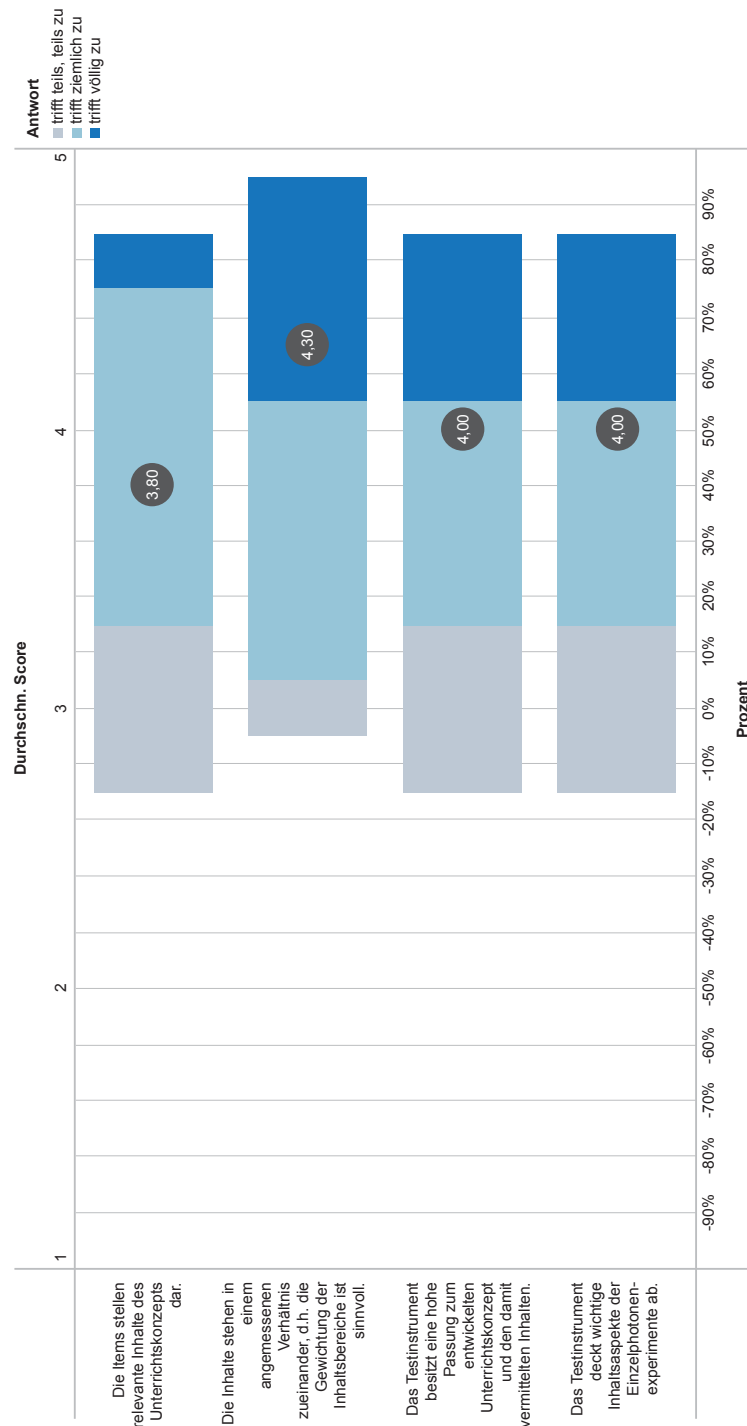


Abbildung 6.9: Diverging Stacked Bar Chart zur den Items aus der Skala zur Inhaltsvalidität als Ganzes. Abbildung bereits publiziert in [13].

6.5 Zusammenfassung zu Objektivität, Reliabilität und Validität

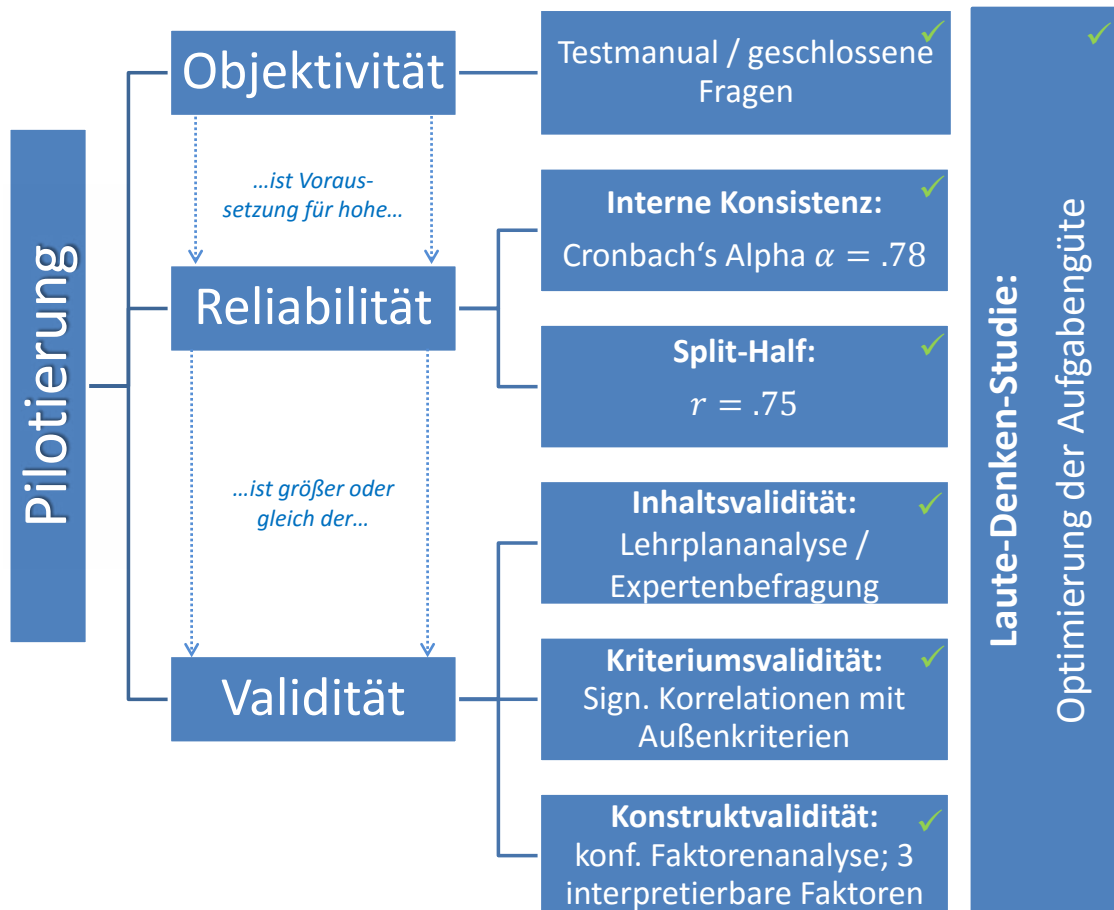


Abbildung 6.10: Zusammenfassung der Ergebnisse der Pilotstudie.

Es ist disziplinübergreifender Konsens der empirischen Unterrichtsforschung, dass Studienergebnisse den Gütekriterien der Objektivität, Reliabilität und Validität genügen müssen. Übergeordnetes Ziel der Pilotstudie II - aufbauend auf der Laute-Denken-Erhebung, die in Kapitel 5 vorgestellt wurde - war daher die Sicherung dieser Gütekriterien für die Erhebung des deklarativen Wissens zur Quantenoptik. Dazu wurde das neu entwickelte Instrument an einer hinreichend großen Stichprobe von $N = 100$ (86 nach Bereinigung der Daten) angehenden Studierenden der Ingenieurwissenschaften erprobt. Die Ergebnisse zeigen, dass eine reliable Erhebung des deklarativen Wissens zur Quantenoptik mit diesem Testinstrument möglich ist. Außerdem stützen Korrelationsanalyse, eine konfirmatorische Faktorenanalyse und eine Expertenbefragung die Annahmen, auf denen eine intendierte Testwertinterpretation fußt. Zwar ist die Validität nichts, das abschließend bewertet werden kann, aber die vorgestellten Methoden stellen fundierte Argumente dafür dar, dass der entwickelte Test zur Quantenoptik eine valide Testwertinterpretation erlaubt:

| Annahme | Maßnahme | Annahme auf Grundlage der Maßnahme gestützt? |
|---|---|---|
| 1. Die Items bilden das Konstrukt Quantenoptik gemäß dem Strukturmodell aus Abb. 4.4 angemessen ab. | Konfirmatorische Faktorenanalyse (vgl. Kapitel 6.4.2), Expertenbefragung (vgl. Kapitel 6.4.3) | ✓ |
| 2. Die Items rufen bei Schülerinnen und Schülern intendierte kognitive Prozesse hervor, insbesondere sind richtige Antworten nicht (ausschließlich) auf Raten zurückzuführen. | Lautes Denken (vgl. Kapitel 5) | ✓ |
| 3. Die Items werden wie intendiert verstanden. | Lautes Denken (vgl. Kapitel 5) | ✓ |
| 4. Die Items und Distraktoren sind für die Schülerinnen und Schüler authentisch. | Lautes Denken (vgl. Kapitel 5) | ✓ |
| 5. Die intendierten Teilkonstrukte werden angemessen durch die jeweiligen Skalen abgebildet. | Expertenbefragung (vgl. Kapitel 6.4.3) | ✓ |
| 6. Das Konstrukt „Quantenoptik“ wird durch den Test zu anderen oder ähnlichen Konstrukten abgrenzbar. | Korrelationsanalysen (vgl. Kapitel 6.4.1) | ✓ |

Tabelle 6.9: Die Annahmen auf denen die intendierte Testwertinterpretation fußt, werden durch unterschiedliche Maßnahmen überprüft und argumentativ gestützt. Die Zusammenfassung aller dieser Einzelmaßnahmen lässt am Ende eine valide Testwertinterpretation zu.

Das Kapitel wird im folgenden Abschnitt abgerundet durch einen Einblick in weitere Ergebnisse aus der Pilotstudie. Dieser Einblick ermöglicht einen Ausblick auf die summative Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik.

6.6 Diskussion weiterer Ergebnisse

Die Ergebnisse der Pilotstudie mit Bezug auf den Lernzuwachs der Studienteilnehmerinnen und -teilnehmer seien nachfolgend berichtet. Es zeigt sich: Das Erlanger Unterrichtskonzept führt auf einen Zuwachs im Begriffswissen zur Quantenoptik und die Befragten fühlen sich im Umgang mit diesen Begriffen signifikant sicherer. Die Ergebnisse

6.6. DISKUSSION WEITERER ERGEBNISSE

erlauben daher einen Einsatz von Konzept und Testinstrument im Rahmen einer größer angelegten summativen Evaluation. Eine Ergänzung durch den in Kapitel 4 eingeführten Vorstellungsfragebogen und die Hinzunahme qualitativer Untersuchungsmethoden, ermöglicht dann einen tiefergehenden Einblick in die Lernergebnisse.

6.6.1 Lernzuwachs

Es liegt ein signifikanter Lernzuwachs mit großer Effektstärke für den Prä-Posttest-Vergleich vor, wie ein nichtparametrischer Wilcoxon-Test für verbundene Stichproben zeigt ($Z(86) = -7.13, p < 0.001, r = 0.54$)⁵.

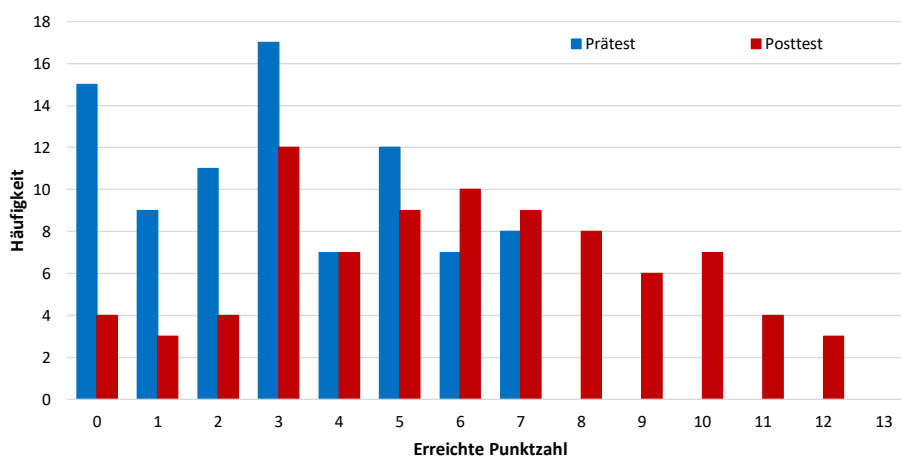


Abbildung 6.11: Darstellung der Prä- und Posttestergebnisse in der Übersicht.

Dieser Lernzuwachs alleine ist natürlich nicht überraschend, da es sich für die Probandinnen und Probanden um neue Fachinhalte handelte. Allerdings ist der signifikante Lernzuwachs ein wichtiges Indiz dafür, dass der mit dem Erlanger Unterrichtskonzept zur Quantenoptik verknüpfte Physikunterricht lernwirksam sein kann, was eine notwendige Voraussetzung für weitere Untersuchungen ist.

| | Minimaler Score / maximaler Score | m | SD | Schiefe (Std.fehler) | Kurtosis (Std.fehler) |
|----------|---|------|------|-------------------------|--------------------------|
| Prätest | 0.00 / 7.00 | 3.12 | 2.24 | 0.18 (0.26) | -1.07 (0.51) |
| Posttest | 0.00 / 12.00 | 5.94 | 3.15 | 0.04 (0.26) | -0.80 (0.51) |

Tabelle 6.10: Deskriptive Statistik zu den Testscores in Prä- und Posttest. Die erreichten Punktzahlen fallen tendenziell auch im Posttest niedrig aus, weil ein Punkt nur vergeben wird, wenn die Probandinnen und Probanden die richtige Antwort geben und zusätzlich mindestens sicher dabei sind (vgl. Kapitel 4).

⁵Die Effektstärke für den Wilcoxon-Test erhält man zu $r = \left| \frac{Z}{\sqrt{n}} \right| = \frac{7.13}{\sqrt{2.86}} = 0.54$.

Teilt man die Stichprobe nach Leistungsterzilen abhängig vom Prätestergebnis auf, so zeigt eine Analyse des absoluten Lernzuwachses, dass dieser für die leistungsstärkeren Probanden ($m = 2.21, SD = 2.17$), niedriger ist, als für Leistungsschwächere ($m = 3.00, SD = 2.66$), sodass ein höherer Lernzuwachs nicht auf ein höheres Vorwissen (sondern auf das Erlanger Unterrichtskonzept) zurückzuführen ist.

Eine vergleichende Untersuchung des Lernzuwachses nach Geschlecht wird in der Hauptstudie durchgeführt, wenn der Überhang männlicher Studienteilnehmer nicht so deutlich ist.

6.6.2 Ankreuzsicherheit

Es liegt ein signifikanter Anstieg der Sicherheit im Ankreuzverhalten mit großer Effektstärke für den Prä-Posttest-Vergleich vor, wie ein nicht-parametrischer Wilcoxon-Test für verbundene Stichproben zeigt ($Z(86) = -8.00, p < .001, r = 0.61$). Die Korrelation $r = 0.33$ ($p < 0.01$) zwischen der mittleren Sicherheit der Probanden im Posttest und der Durchschnittsnote in Physik ist statistisch signifikant.

Insbesondere zeigt sich, dass die Befragten im Prä-Posttest-Vergleich bei allen Items signifikant sicherer werden, bis auf bei Item 4, bei dem mit dem atomaren Energieübergang ein Inhalt abgefragt wird, der nicht explizit Teil des Unterrichtskonzepts ist. Es liegt die Vermutung nahe, dass der Lernzuwachs im Prä-Posttest-Vergleich hauptsächlich in den Items der Faktoren *Photonen* und *Einzelphotonen-Experimenten* erreicht wird, weniger in denen zu *Theoretischen Aspekten*. Solche und andere Fragen gilt es in der Hauptstudie genauer zu untersuchen, was Ziel in den nachfolgenden Kapitel ist.

6.6. DISKUSSION WEITERER ERGEBNISSE

Wilcoxon-Test: Ankreuzsicherheit je Item (Prä-Post)^a

| | Item 1 | Item 2 | Item 3 | Item 4 | Item 5 | Item 6 |
|---|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Z | -7,275 ^b | -7,547 ^b | -3,998 ^b | -1,591 ^b | -6,205 ^b | -6,585 ^b |
| Asymptotische Signifikanz (2-seitig) | ,000 | ,000 | ,000 | ,112 | ,000 | ,000 |

Wilcoxon-Test: Ankreuzsicherheit je Item (Prä-Post)^a

| | Item 7 | Item 8 | Item 9 | Item 10 | Item 11 |
|---|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Z | -4,279 ^b | -3,919 ^b | -5,086 ^b | -5,548 ^b | -7,400 ^b |
| Asymptotische Signifikanz (2-seitig) | ,000 | ,000 | ,000 | ,000 | ,000 |

Wilcoxon-Test: Ankreuzsicherheit je Item (Prä-Post)^a

| | Item 12 | Item 13 |
|---|---------------------|---------------------|
| Z | -7,614 ^b | -5,405 ^b |
| Asymptotische Signifikanz (2-seitig) | ,000 | ,000 |

a. Wilcoxon-Test

b. Basiert auf positiven Rängen.

Tabelle 6.11: Wilcoxon-Test zur Ankreuzsicherheit im Prä-Posttest-Vergleich je Item.

Teil III

Summative Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik

KAPITEL 7

Stichprobe und Methodik der Auswertung

„If you're a scientist, and you have to have an answer, even in the absence of data, you're not going to be a good scientist.“

- Neil deGrasse Tyson

Einordnung in den Kontext der Arbeit

Teil 2 dieser Arbeit stellte erste Erkenntnisse zum Physiklernen mit dem Erlanger Unterrichtskonzept zur Quantenoptik bereit: Die Ergebnisse einer formativen Evaluation zeigten, dass die vorgenommenen Elementarisierungen quantenoptischer Experimente erfolgreich Lernprozesse bei Schülerinnen und Schülern initiieren können. Das Design der Studie zur summativen Evaluation wurde in Kapitel 4 vorgestellt. Mit einem neu entwickelten Testinstrument kann das deklarative Wissen zur Quantenoptik unter Beachtung der Testgütekriterien erhoben werden, wie in einem detaillierten Pilotierungsprozess mit zwei Studien argumentativ abgeleitet (Kapitel 5 und 6). Dieses siebte Kapitel ist nun der Beginn einer Reihe von Kapiteln, die sich ganz konkret auf die summative Evaluation des Konzepts beziehen. Hier wird zunächst die zugrunde liegende Stichprobe dargestellt, um in den daran anschließenden Kapiteln nach und nach die zentralen Fragen der Arbeit zu klären: Ist es möglich, dass man mit Schülerinnen und Schüler moderne Experimente aus der Quantenoptik behandelt und erwerben die Lernenden ein umfassendes deklaratives Wissen zur Quantenoptik? Sind die Schülerinnen und Schüler ferner in der Lage, dieses deklarative Wissen zu vernetzen und für konsistente Argumentationen im neuen Begriffsfeld zu nutzen? Gelangen die Lernenden über das Wissen hinaus zu quantenphysikalisch adäquanten Vorstellungen und legen sie ein mechanistisch geprägtes Bild ab? Und letzten Endes: Wie bewerten die Lehrerinnen und Lehrer das Erlanger Unterrichtskonzept und erachten sie es als praxistauglichen Unterrichtsvorschlag zur Quantenphysik?

7.1 Stichprobe

An der Studie zur summativen Evaluation nahmen insgesamt 12 Physikkurse mit 12 verschiedenen Lehrkräften und insgesamt $N = 171$ Schülerinnen und Schülern der gymnasialen Oberstufe teil¹, wobei 87 weiblich waren. Die letzten beiden Physikzeugnisnoten wurden erhoben und zu einer „Physiknote“ gemittelt ($m = 2.56$, $SD = 1.01$).

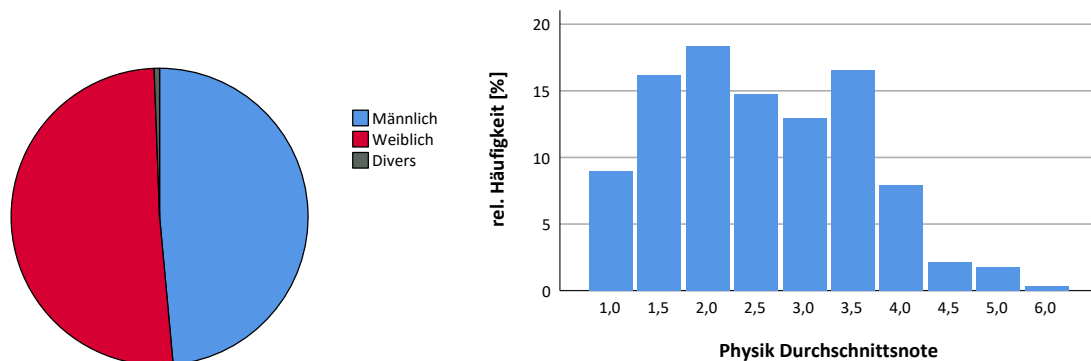


Abbildung 7.1: Links: Geschlechterverteilung (48.5% männlich, 50.9% weiblich). Rechts: Verteilung der Physiknoten der Lernenden der Stichprobe in Intervallen von halben Noten ($m = 2.56$, $SD = 1.01$).

Außerdem wurden die Schülerinnen und Schüler nach ihrem Interesse an Quantenphysik befragt. Es ergab sich folgendes Bild:

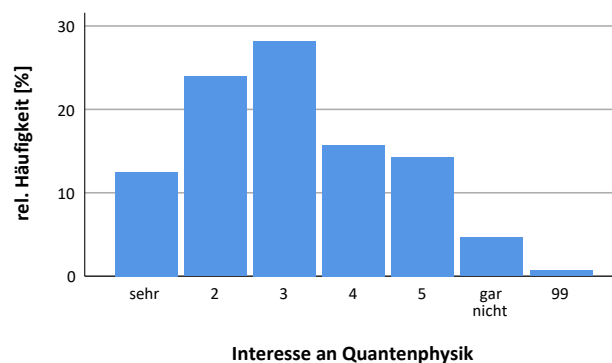


Abbildung 7.2: Interesse an Quantenphysik der Befragten der Hauptstudie. „99“ bedeutet „fehlender Wert“.

¹21 der 171 Schülerinnen und Schüler waren zum Erhebungszeitpunkt in der 11. Jahrgangsstufe (ein Kurs). Diese wurden in die Erhebung inkludiert, weil die Quantenphysik in den verschiedenen dt. Bundesländern sowieso unterschiedlich zeitlich curricular verankert ist. Wichtig ist, dass keiner der Lernenden vorunterrichtliche Erfahrungen zur Quantenphysik besaß. Das Anschreiben an die Eltern der an der Hauptstudie teilnehmenden Schülerinnen und Schüler findet man in Anhang F dieser Arbeit.

Die nachfolgende Tabelle zeigt im Detail die Struktur der Stichprobe für die drei in der summativen Evaluation eingesetzten Erhebungsmethoden Fachwissenstest Quantenoptik, Vorstellungsfragebogen und Leitfadeninterviews (vgl. ausführliche Darstellung in Kapitel 4). Für Vergleiche zwischen Erhebungszeitpunkten wurden jeweils nur die Daten derjenigen Schülerinnen und Schüler herangezogen, von denen zu allen Erhebungszeitpunkten vollständige Datensätze vorliegen.

| | Fachwissen Prä | Fachwissen Post | Fachwissen Follow-Up | Vorstellungs- fragebogen |
|---------------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| Jungen | 83 (0) | 79 (4) | 58 (25) | 50 (33) |
| Mädchen | 87 (0) | 80 (7) | 74 (13) | 68 (19) |
| ohne Angabe | 1 (0) | 0 (1) | 0 (1) | 0 (1) |
| <i>N</i> | 171 (0) | 159 (12) | 132 (39) | 118 (53) |
| Leitfaden- interview | | | | |
| Jungen | 15 | | | |
| Mädchen | 10 | | | |
| ohne Angabe | 0 | | | |
| <i>N</i> | 25 | | | |

Tabelle 7.1: Stichprobe der summativen Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik. In Klammern sind die fehlenden Werte angegeben, also die Zahl der Probanden von denen ein Rückläufer zum jeweiligen Testzeitpunkt fehlt. Der starke Rückgang der Teilnehmendenzahl zum Follow-Up-Test begründet sich damit, dass dieser in zwei Kursen aus Zeitgründen von Seiten der Schulen nicht durchgeführt werden konnten. Der Vorstellungsfragebogen wurde aus ökonomischen Gründen nur in neun Kursen eingesetzt.

7.2 Statistische Methoden

In dieser Mixed-Methods-Studie kommen mit den verschiedenen Methoden auch unterschiedliche statistische Verfahren zum Einsatz. In diesem Abschnitt werden die statistischen Verfahren zur Auswertung der Daten vorgestellt. Es wird dazu getrennt auf die Auswertung der Daten aus den quantitativen Erhebungsmethoden *Fachwissenstest Quantenoptik* und dem *Vorstellungsfragebogen* (Kapitel 7.2.1) sowie denen aus der *Interviewstudie* eingegangen (Kapitel 7.2.2). Hierbei soll in diesem Kapitel der Fokus nur auf den verwendeten statistischen Methoden an sich liegen, mit denen die mit den verschiedenen Erhebungsverfahren gewonnen Daten im Rahmen dieser Studie ausgewertet wurden. Der Einsatz der Methoden innerhalb der summativen Evaluation und die allgemeine Auswertemethodik, z.B. für den Fachwissenstest oder die Leitfadeninterviews, wurden in Kapitel 4 ausführlich beschrieben.



Zur Auswertung der in dieser Studie erhobenen Daten wurde die in der empirischen Forschung etablierte Software SPSS in der Version 25 verwendet oder auf die freie Statistiksoftware R zurückgegriffen.

7.2.1 Testinstrument zum deklarativen Wissen Quantenoptik und Vorstellungsfragebogen

Zur Auswertung der Ergebnisse des Fachwissenstests und des Vorstellungsfragebogens kommen neben deskriptivstatistischen Kenngrößen hauptsächlich quantitative Verfahren zum Einsatz. Zum Beispiel werden Mittelwertsvergleiche notwendig, um etwa einen Lernzuwachs zwischen verschiedenen Erhebungszeitpunkten auf statistische Signifikanz zu prüfen. In der Regel sind dabei eine abhängige Variable, nämlich wie in diesem Fall das Testergebnis im Fachwissenstest und eine unabhängige Variable (z.B. das Geschlecht), interessant. Für den Einfluss mehrerer unabhängiger Variablen auf eine abhängige Variable wird die multiple lineare Regression eingesetzt. Die Auswahl der richtigen statistischen Verfahren hängt eng zusammen mit der Verteilung des untersuchten Merkmals innerhalb der Stichprobe. Beim Vergleich von Merkmalsausprägungen innerhalb einer Stichprobe zu verschiedenen Zeitpunkten spielt die Verteilung der Differenzen der Messwerte zwischen den Erhebungszeitpunkten die wesentliche Rolle. Ist die Differenzvariable normalverteilt, so greift man zu parametrischen Verfahren, anderenfalls nutzt man nicht-parametrische Testverfahren [163]. Im Bezug auf die Erhebung des deklarativen Wissens zur Quantenoptik sind also der absolute Lernzuwachs und die Änderung der Ankreuzsicherheit auf Normalverteilung zu prüfen [163, S. 59]. Dazu dient unter anderem der Kolmogorov-Smirnov-Test [50, S. 218]. Abb. 7.3 gibt einen Überblick über statistische Verfahren zur Untersuchung von Mittelwertunterschieden. Die für diese Arbeit benötigten Tests werden im Anschluss daran kurz beschrieben.

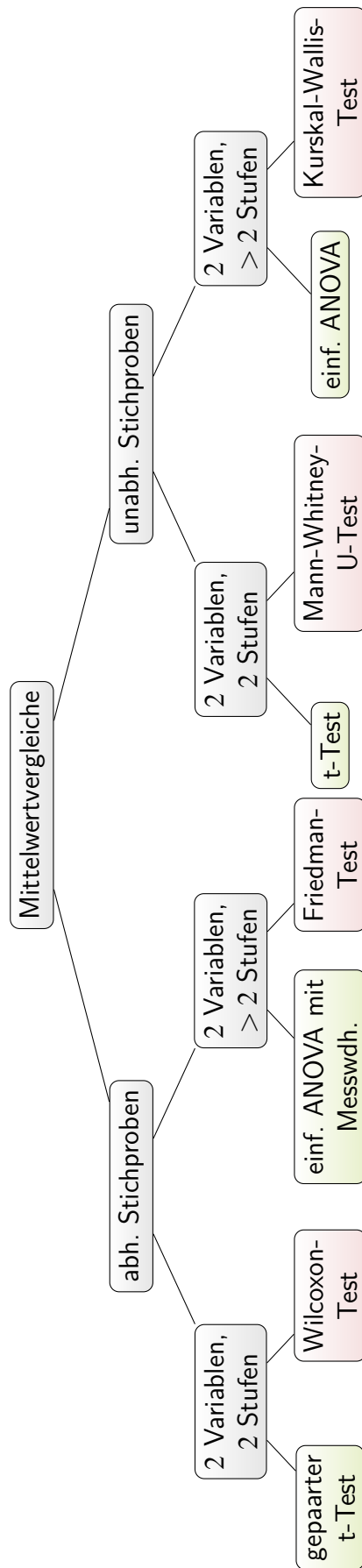


Abbildung 7.3: Übersicht über Tests zum Mittelwertvergleich. Mit Stufen wird hier die Zahl der Messzeitpunkte gemeint. Abhängige Stichproben liegen vor, wenn sich über die Erhebungszeitpunkte die beforschte Personengruppe nicht ändert. Ein Verfahren für unabhängigen Stichproben kommt zum Einsatz, wenn man zwischen verschiedenen Personengruppen innerhalb einer oder verschiedener Stichprobe unterscheidet; z.B. um geschlechterspezifische Unterschiede auf Signifikanz zu prüfen. Grün hinterlegte Verfahren sind geeignet, wenn die abhängige (Differenz-)Variable normalverteilt ist und von Varianzhomogenität zwischen den Gruppen ausgegangen werden kann. Man spricht hier von parametrischen Verfahren. Alternativen für (Differenz-)Variablen, die nicht normalverteilt sind, stellen die nicht-parametrischen Test dar [163, S. 239] (rot hinterlegt). Mit diesen können bis zu 95% der Testpower von parametrischen Testverfahren erreicht werden [170].

Für eine detaillierte Übersicht über die in dieser Studie verwendeten statistischen Begriffe und Verfahren sei auf die Literatur zu empirischer Forschung verwiesen [163, 50], insbesondere für die mathematische Begründung der statistischen Methoden. Wir wollen im Folgenden nur die zentralen Ideen und Konzepte festhalten.

7.2.1.1 Ratingskalen

Ratingskalen kommen in dieser Studie sowohl beim Vorstellungsfragebogen zum Einsatz, als auch zur Erhebung der affektiven Lernermerkmale. Der Einsatz von Ratingskalen ist in der fachdidaktischen Forschung, wie in allen Sozialwissenschaften, weit verbreitet [50, S. 182]. Im Allgemeinen kann nicht davon ausgegangen werden, dass gleiche Ratingdifferenzen mit gleichen Merkmalsunterschieden korrespondieren. Deswegen werden mit Ratingskalen erhobene Merkmale als ordinalskaliert bezeichnet.



Beispiel Ratingskala: Die sechsstufige Notenskala von Schulen ist ein prominentes Beispiel für eine Ordinalskala, deren Bedeutung bekannt ist: 1 = sehr gut, ..., 6 = ungenügend. Stellen wir uns die Situation einer mündlichen Abschlussprüfung vor, die von zwei Lehrkräften beurteilt wird. Ein Schüler A bekommt von den beiden unabhängigen Lehrkräften auf dieselbe Prüfung die Note 1 von der einen und die Note 3 von der anderen Lehrkraft. Im Gegensatz dazu erhalte Schüler B von der einen Lehrkraft die Note 3, von der andern die Note 5. Die Differenz der beiden Beurteilungen ist in beiden Fällen identisch - zumindest mathematisch:

$$3 - 1 = 2 = 5 - 3.$$

Aus inhaltlicher Sicht aber nicht: Ob Schüler A nun eine 1 oder eine 3 bekommt, ist für diesen subjektiv mit Sicherheit entscheidend, aber das Gesamturteil ist in beiden Fällen identisch: Schüler A hat die Prüfung bestanden. Bei Schüler B ist die Situation eine andere - auch hier ist die Differenz der Beurteilungen 2. Aber der inhaltliche Unterschied ist um einiges bedeutsamer: während B bei der einen Lehrkraft bestehen würde (Note 3), wäre das Urteil der anderen Lehrkraft „durchgefallen“.

Das ausführlich behandelte Beispiel zeigt: Mittelwertbildung ergibt für Ordinalskalen im Allgemeinen keinen Sinn, wenn Abstände zwischen den Stufen nicht als gleich angesehen werden können. Trotzdem ist es gängige Forschungspraxis dies zu tun. Mit dieser Tradition wird in dieser Arbeit nicht gebrochen. Bei den Daten, die mit Ratingskalen erhoben wurden, wird von intervallskalierten Daten ausgegangen, denn bei [50, S. 181ff] werden mehrere Studien berichtet und diskutiert, die Argumente dafür bereitstellen, dass dies forschungsmethodisch in Ordnung ist. Gleichmaßen verbale und numerisch unterstuft fünfstufige Ratingskalen sollen in dieser Studie durchweg gleich verwendet werden und dafür sorgen, dass die Differenzen zwischen den Antwortkategorien von den Befragten als identisch angesehen werden: *1 = stimmt gar nicht*, *2 = stimmt nicht*, *3 = stimmt teils*, *teils*, sowie *4 = stimmt* und *5 = stimmt völlig*.

7.2.1.2 p-Werte

Testet man mittels statistischer Tests eine sog. Null- (H_0) gegen eine Alternativhypothese (H_1), so ist das Ergebnis solcher Tests ein p -Wert. Dieser gibt an, „wie wahrscheinlich ein Versuchsergebnis ist, wenn die Nullhypothese zutrifft“ [147]. Ist diese Wahrscheinlichkeit - also der p -Wert - kleiner, als ein zuvor festgelegtes Signifikanzniveau (meist 5%), so verwirft man die Nullhypothese: die fälschliche Ablehnung von H_0 geschieht dann mit einer Wahrscheinlichkeit, die gerade dem p -Wert entspricht [147]. Im Rahmen der summativen Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts werden die etablierten Signifikanzniveaus nach APA-Norm verwendet [153]:

- $p < 0.05$: Ergebnis ist statistisch signifikant (*)
- $p < 0.01$: Ergebnis ist statistisch hoch signifikant (**)
- $p < 0.001$: Ergebnis ist statistisch höchst signifikant (***)



Die Interpretation von p -Werten in der empirischen Forschung wird mitunter kritisiert [162]. Das Verwerfen einer Null- zugunsten einer Alternativhypothese darf nicht mit einem Beweis der Gültigkeit der Alternativhypothese gleichgesetzt werden. Umgekehrt kann die fehlende statistische Signifikanz nicht mit einem Nachweis für das Ausbleiben eines Effekts identifiziert werden. Bei [2] wird stattdessen vorgeschlagen, in solchen Fällen von einem Fehlen von Indizien für einen Effekt zu sprechen.

Ein Problem ist in diesem Kontext vor allem, dass bei großen Stichproben bereits kleine Abweichungen von der Nullhypothese signifikante Ergebnisse liefern können, die aber nicht mit einem echten Absoluteffekt zu tun haben [147]. Indizien für das Abweichen der Stichprobendaten von einer Nullhypothese unabhängig von dem Einfluss der Stichprobengröße liefern Effektstärken. Auf diese gehen wir in einem der folgenden Abschnitte genauer ein (vgl. 7.2.1.6). Zunächst werden aber die statistischen Verfahren vorgestellt, mit denen Unterschiede zwischen Gruppen überhaupt festgestellt werden können.

7.2.1.3 Der t-Test

Der t -Test für unabhängige Stichproben gehört zu den parametrischen Testverfahren und es gelten nach [32, S. 256] die folgenden Voraussetzungen:

1. Abhängige Variable ist intervallskaliert.
2. Normalverteilung der abhängigen Variable in beiden Stichproben
3. Unabhängigkeit der Messwerte
4. Varianzhomogenität

Mittels eines t -Tests für unabhängige Stichproben wird getestet, ob sich die Mittelwerte einer abhängigen Variable in zwei unabhängigen Stichproben unterscheiden [163]. Er kommt z.B. zum Einsatz, wenn geschlechterspezifische Unterschiede auf statistische Signifikanz getestet werden sollen. Die zugrundeliegenden Null- bzw. Alternativhypothesen lauten:

H_0 : Es liegt kein Mittelwertsunterschied zwischen den unabhängigen Gruppen vor.

H_1 : Es liegt ein Mittelwertsunterschied zwischen den unabhängigen Gruppen vor.

Die Prüfung auf Signifikanz erfolgt mit Hilfe der t-Verteilung (bei gegebener Zahl der Freiheitsgrade df und dem gewählten Signifikanzniveau α). Man vergleicht dazu einen kritischen t -Wert mit dem Wert der Teststatistik [191, S. 129].



Beispiel t-Test: Man könnte untersuchen wollen, ob der Ruhepuls der Spieler einer Fußballmannschaft signifikant von dem der Spieler einer anderen Mannschaft abweicht.

In dem Fall, dass die Normalverteilungsvoraussetzung nicht erfüllt werden kann, kann alternativ auf den nicht-parametrischen Mann-Whitney-U-Test zurückgegriffen werden [230]. Beim Mann-Whitney-U-Test handelt es sich um einen verteilungsfreien Test „für den Vergleich zentraler Tendenzen zweier unabhängiger Stichproben“ [19, S. 140]. Mathematische Details sind beschrieben bei [33, S. 131ff].

Man wendet den *t-Test für abhängige Stichproben* an, wenn die Entwicklung einer Merkmalsausprägung in einer Stichprobe über zwei Messzeitpunkte untersucht werden soll. Die zugrundeliegenden Null- bzw. Alternativhypothesen lauten:

H_0 : Es liegt kein Mittelwertsunterschied innerhalb der Stichprobe zwischen den Erhebungszeitpunkten vor.

H_1 : Es liegt ein Mittelwertsunterschied innerhalb der Stichprobe zwischen den Erhebungszeitpunkten vor.



Beispiel t-Test für abhängige Stichproben: Am Beispiel der Fußballmannschaft könnte man den Ruhepuls der Spieler vor und nach einem Trainingslager messen und untersuchen, ob sich dieser signifikant geändert hat.

Falls die Normalverteilungsvoraussetzung nicht erfüllt ist, greift man zum nicht-parametrischen Wilcoxon-Test zurück [232]. Der manchmal auch als Vorzeichenrangtest bezeichnete Test dient der Prüfung, „ob sich 2 abhängige Stichproben in ihrer zentralen Tendenz unterscheiden“ [19, S. 191]. Mathematische Details sind beschrieben bei [33, S. 171ff].

7.2.1.4 Die einfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung

t-Tests sind auf den Vergleich von zwei Gruppen beschränkt, weil sonst sog. α -Kumulierung die Folge wäre [70, S. 391] - das heißt: testet man immer zum Signifikanzniveau α , so steigt mit der Zahl der Tests die Wahrscheinlichkeit für einen Fehlschluss [211].



Beispiel α -Kumulierung: Man will den Leistungsstand von Schülerinnen und Schüler zu drei Messzeitpunkten kontrollieren und ist daran interessiert, ob sich mit der Zeit ein signifikanter Lernzuwachs ergibt. Die Wahrscheinlichkeit die Nullhypothese „kein signifikanter Lernzuwachs“ fälschlicherweise zu verwerfen, ist durch das Signifikanzniveau α nach oben beschränkt. Häufig ist $\alpha = 0.05$. Wir wollen also berechnen, ob es zwischen

- dem ersten und zweiten,
- dem zweiten und dritten und
- dem ersten und dritten

Messzeitpunkt signifikante Unterschiede gibt. Würden wir dazu drei t-Tests mit verbundenen Stichproben rechnen, dann wäre die Wahrscheinlichkeit dafür, dass wir mindestens eine Nullhypothese fälschlicherweise verwerfen, gegeben zu zu: $1 - (1 - \alpha)^3 = 0.143$. Die Wahrscheinlichkeit für mindestens eine fälschlich verworfene Nullhypothese läge hier bereits bei 14.3% und sie wäre noch höher, wenn mehr Gruppen zu vergleichen wären.

Eine Varianzanalyse - kurz ANOVA - ermöglicht es auch mehr als zwei Gruppen hinsichtlich der Ausprägung eines Merkmals zu unterscheiden. Das Herzstück der ANOVA ist die Zerlegung der Gesamtvarianz im Datensatz in

1. die Varianz zwischen den zu vergleichenden Gruppen und
2. die Varianz innerhalb der einzelnen Gruppen.

Die Varianz innerhalb der Gruppen - also unter Probandinnen und Probanden, die das gleiche Treatment erfahren haben - ist auf zufällige Einflüsse zurückzuführen, während die Varianz zwischen den unterschiedlichen Gruppen neben unsystematischer Einflüsse eben auch auf systematischen Effekten fußt, die durch das jeweilige Treatment begründet werden [70, S. 393]. Der Vergleich der Varianzen geschieht mittels des F -Werts, der sich gerade als Quotient der Varianzen innerhalb bzw. zwischen den Gruppen berechnet [70, S. 402]:

$$F = \frac{\sigma_{\text{zwischen}}^2}{\sigma_{\text{innerhalb}}^2} = \frac{MS_{\text{zwischen}}}{MS_{\text{innerhalb}}}$$

MS steht dabei für „Mean squares“ und berechnet sich als Quotient der Summe quadratischer Abweichungen $SS_{\text{innerhalb}}$ vom Gruppen- (für $MS_{\text{innerhalb}}$) bzw. Gesamtmittelwert SS_{zwischen} (für MS_{zwischen}) und der Zahl der Freiheitsgrade df [70]. F -Werte, die deutlich von $F = 1.00$ verschieden sind, liefern Indizien dafür, dass ein systematischer Treatmenteffekt feststellbar ist [70, S. 505], denn dann sind die Unterschiede zwischen Gruppen größer, als innerhalb der Gruppen.

7.2. STATISTISCHE METHODEN

Untersucht man nur eine Stichprobe zu unterschiedlichen Zeitpunkten (genannt Faktorstufen), so greift man auf eine ANOVA mit Messwiederholung zurück. Dabei geht man aber nicht auf die Unterschiede innerhalb oder zwischen Gruppen, sondern auf Unterschiede auf Individualebene, d.h. zwischen oder innerhalb Personen ein. Das Verfahren funktioniert aber, wie oben beschrieben. Der F -Wert berechnet sich in diesem Fall nach [70] zu

$$F = \frac{MS_{\text{zwischen Zeitpunkten}}}{MS_{\text{Fehler}}}.$$

Der Nenner ist dabei ein Maß für die Varianz in den Daten, die erwartet würde, wenn es keine systematischen Unterschiede bedingt durch das Treatment oder individuelle Unterschiede gäbe [70, S. 440]. Ein häufig verwendetes Effektstärkemaß wird als η^2 bezeichnet² und berechnet sich zu:

$$\eta^2 = \frac{SS_{\text{zwischen Zeitpunkten}}}{SS_{\text{zwischen Zeitpunkten}} + SS_{\text{Fehler}}},$$

wobei $SS_{\text{zwischen Zeitpunkten}}$ die Quadratsummen des Effekts und SS_{Fehler} die Quadratsummen innerhalb der Messungen zu den einzelnen Zeitpunkten meint [70]. η^2 überschätzt allerdings den Anteil aufgeklärter Varianz, sodass wir hier stattdessen zum von [154] empfohlenen Effektstärkemaß ω^2 greifen.

Der ANOVA mit Messwiederholung liegt das folgende Hypothesenpaar zugrunde:

H_0 : Die durchschnittlichen Merkmalsausprägungen der Individuen unterscheiden sich zwischen den Erhebungszeitpunkten nicht.

H_1 : Die durchschnittlichen Merkmalsausprägungen der Individuen unterscheiden sich zwischen mindestens zwei der Erhebungszeitpunkte.

In dem Fall, dass der F -Wert statistisch signifikant wird, die Nullhypothese H_0 also verworfen wird, greift man auf Post-hoc-Tests zurück, um die Gruppen bzw. Werte zu den Messzeitpunkten paarweise miteinander zu vergleichen. Erst Post-hoc-Tests erlauben Aussagen darüber, *welche* Gruppen sich statistisch signifikant unterscheiden. Details - auch zum mathematischen Formalismus - zur ANOVA findet man bei [58, 70]. Voraussetzungen für die Durchführung einer ANOVA mit Messwiederholung sind nach [70, S. 448]:

1. Die Messwerte sind unabhängig voneinander.
2. Die abhängige Variable ist intervallskaliert und für jede Faktorstufe normalverteilt.
3. Der Innersubjektfaktor - hier der Erhebungszeitpunkt - ist nominalskaliert und hat mindestens drei Faktorstufen.
4. Sphärizität ist gegeben, d.h. die Varianzen der Differenzen zwischen den Messzeitpunkten sind gleich. Diese Voraussetzung prüft man mit dem Mauchly-Test.

²Manchmal ist auch von dem partiellen Eta-Quadrat die Rede, aber für einfaktorielle ANOVAs sind beide identisch.

Ist eine der Voraussetzungen für die Varianzanalyse mit Messwiederholung nicht erfüllt, so kann auf den Friedman-Test zurückgegriffen werden [70, S. 440] - dieser erfüllt denselben Zweck wie die ANOVA mit Messwiederholung (vgl. Abbildung 7.3). Der Friedman-Test ist ausführlich beschrieben bei [33, S. 200ff].



Beispiel ANOVA: Ein Anwendungsbeispiel einer ANOVA mit Messwiederholung wäre die Beforschung der Wirksamkeit eines neuen Trainingsprogramms. Eine Gruppe Trainierender macht ein neues Mobilitätsprogramm und es wird vor, während und nach der Intervention untersucht, wie sich die Beweglichkeit der Sportlerinnen und Sportler verbessert. In einer solchen Studie ist der Erhebungszeitpunkt daher der relevante Faktor, nicht die Gruppenzugehörigkeit.

7.2.1.5 Die multiple lineare Regressionsanalyse

Mit Hilfe von Regressionsmodellen lässt sich der Einfluss von mehreren unabhängigen Variablen auf eine abhängige Variable untersuchen. Wie die einfache lineare Regression auch, basiert die multiple lineare Regression auf der Methode der kleinsten Quadrate. Als Schätzer \hat{y} für die abhängige Variable y verwendet man die Linearkombination der k unabhängigen Variablen x_i - auch Regressoren genannt [99, S. 274] - mit den Regressionskoeffizienten β_i plus eines Fehlerterms ε , der einer nicht beobachtbaren Störgröße entspricht [99, S. 274]:

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon.$$

Details zur Parameterschätzung im Regressionsmodell findet man bei [99].

Zur Einschätzung der Güte einer linearen Regression eignet sich das Bestimmtheitsmaß R^2 , das auf der Varianzzerlegung beruht [99, S. 298].

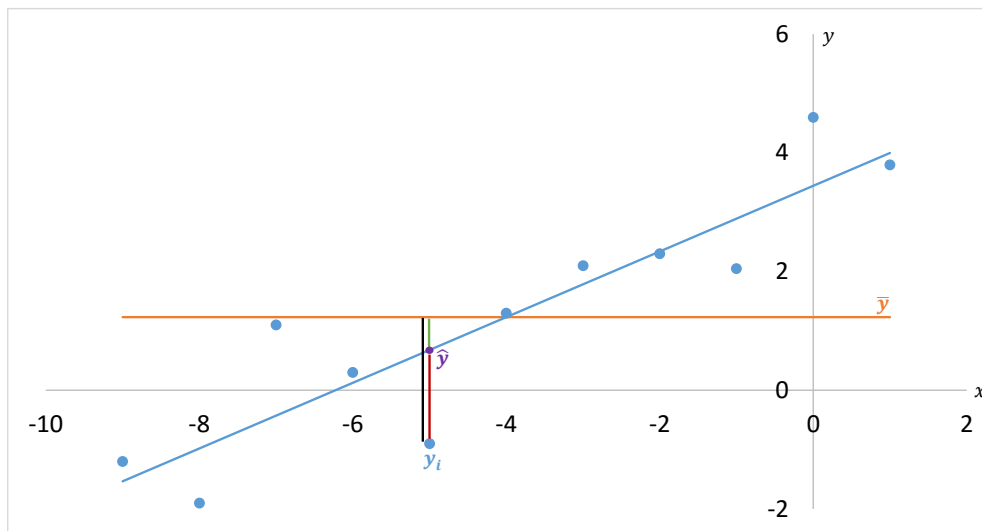


Abbildung 7.4: Visualisierung der Interpretation von R^2 : Die vertikale schwarze Linie entspricht der Abweichung $\bar{y} - y_i$ der Beobachtung y_i vom Stichprobenmittelwert \bar{y} . Die grüne Linie entspricht der erklärten Abweichung, d.h. diesen Anteil des Fehlers kann man unter Hinzunahme der Regressoren erklären. Die rote Linie hingegen - das Residuum - entspricht der Abweichung zwischen beobachtetem Wert und dem vom Regressionsmodell vorhergesagten Wert \hat{y} . Das Bestimmtheitsmaß R^2 entspricht nun gerade dem Anteil erklärter Varianz (Länge der grünen Linie) an der Gesamtvarianz (schwarze Linie).



Entgegen eines weit verbreiteten Präkonzepts, kann mittels R^2 nicht entschieden werden, ob ein Modell richtig oder falsch ist. Auch über die Genauigkeit der Schätzung sagt R^2 nichts aus. Konfidenzintervalle der Koeffizienten der multiplen Regression sind dazu besser geeignet. Details findet man bei [99, S. 313ff].

7.2.1.6 Effektstärken

Wir haben bereits die Problematik statistischer Auswertungen in Verbindung mit p-Werten dargelegt. Effektstärken schaffen Abhilfe, um die Ergebnisse statistischer Test unabhängig von der Stichprobengröße beurteilen zu können. Bei [201] wird die Effektstärke gar als das zentrale Ergebnis einer quantitativen Studie bezeichnet. In dieser Studie werden deswegen für alle statistisch signifikanten Ergebnisse geeignete Effektstärkemaße berichtet. Die für die in dieser Studie verwendeten statistischen Verfahren berichteten Effektstärke werden nachfolgend in der Übersicht dargestellt:

- *t-Test für unabhängige Stichproben 1 und 2*: Das berichtete Effektstärkemaß Cohens d berechnet sich aus den Mittelwerten \bar{x}_1 und \bar{x}_2 innerhalb der Stichproben 1 und 2 zu

$$d = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sigma_p},$$

wobei

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)\sigma_1^2 + (n_2 - 1)\sigma_2^2}{(n_1 - 1) + (n_2 - 1)}}$$

die gepoolte Standardabweichung ist [135]. Dabei bezeichnen $n_{1/2}$ die Stichprobengrößen und σ_1 die Standardabweichung in Gruppe 1, σ_2 die in Gruppe 2. Die Interpretation von d erfolgt nach [42] so:

- $0.2 \leq d < 0.5$: kleiner Effekt
 - $0.5 \leq d < 0.8$: mittlerer Effekt
 - $d \geq 0.8$: großer Effekt.
- *Wilcoxon-Test, Mann-Whitney-U-Test und Friedman-Test*: Für diese Tests berichtet man den Korrelationskoeffizienten nach Pearson als Effektstärkemaß. Man berechnet r aus der Teststatistik Z und dem Stichprobenumfang n nach [230, 232] zu

$$r = \left| \frac{Z}{\sqrt{n}} \right|,$$

wobei die Interpretation nach [42] folgendermaßen vorgenommen wird:

- $r \geq 0.1$: kleiner Effekt
 - $r \geq 0.3$: mittlerer Effekt
 - $r \geq 0.5$: großer Effekt
- *ANOVA*: Das etablierte Effektstärkemaß η^2 überschätzt den Anteil aufgeklärter Varianz gerade für kleine Stichproben, weshalb wir hier wie in 7.2.1.4 beschrieben stattdessen zum von [154] empfohlenen Effektstärkemaß ω^2 greifen. ω^2 berechnet sich zu

$$\omega^2 = \frac{f^2}{1 + f^2},$$

wobei f^2 nach [164, S. 37] aus der F-Statistik berechnet werden kann zu

$$f^2 = \frac{(F_{df_{\text{Zähler}}, df_{\text{Nenner}} - 1}) df}{N}.$$

Das ω^2 kann nach [42] folgendermaßen interpretiert werden:

- $\omega^2 \geq 0.01$: kleiner Effekt
- $\omega^2 \geq 0.06$: mittlerer Effekt
- $\omega^2 \geq 0.14$: großer Effekt

- *Regressionsanalyse*: Aus dem Bestimmtheitsmaß R^2 lässt sich nach [231] die Effektstärke f^2 via

$$f^2 = \frac{R^2}{1 - R^2}$$

berechnen, wobei die Interpretation nach [42] folgendermaßen vorgenommen werden kann:

- $f^2 \geq 0.02$: schwacher Effekt
- $f^2 \geq 0.15$: mittlerer Effekt
- $f^2 \geq 0.35$: starker Effekt

Details über Effektstärkemaße findet man auch bei [58].

7.2.2 Leitfadengestützte Interviews

Die Daten aus der Interviewstudie werden, wie in Kapitel 4 ausführlich beschrieben, mit Hilfe eines Kodierleitfadens kategoriengeleitet mittels qualitativer Inhaltsanalyse ausgewertet. Um Typen von Schülervorstellungen zu extrahieren, werden außerdem clusteranalytische Verfahren genutzt. Der φ -Koeffizient wird außerdem berichtet als Zusammenhangsmaß zwischen zwei dichotomen Variablen. Damit wird für gewisse Schülervorstellungen gezeigt, inwiefern diese tendenziell in Abhängigkeit mit anderen auftreten.

7.2.2.1 Der χ^2 -Test und der φ -Koeffizient

Wir wollen aus den Ergebnissen der Interviewstudie ableiten, inwiefern gewisse Vorstellungen Lernender zu Aspekten der Quantenphysik tendenziell gepaart mit anderen auftreten. Oder anders formuliert: wir wollen explorativ untersuchen, ob sich eine Abhängigkeit von einer Vorstellung mit bestimmten anderen ergibt. Dazu werden die Auswertungskategorien als dichotom kodierte Variablen aufgefasst, d.h. pro Befragtem kann jede Kategorie maximal einmal zugeordnet werden: Macht ein Schüler oder einer Schülerin Aussagen, die in eine der Kategorien des Kategoriensystems fällt, wird eine 1 für diese Kategorie kodiert, sonst eine 0. So kann in einer Datentabelle übersichtlich dargestellt werden, welche Vorstellungen bei den einzelnen Lernenden vorliegen, und welche nicht - zumindest auf Grundlage dieser Interviewstudie. Um die Unabhängigkeit zweier Variablen - also zweier Kategorien - statistisch zu überprüfen, nutzt man den χ^2 -Test mit folgendem Hypothesenpaar [19, S. 91]:

H_0 : Die beiden Merkmale sind voneinander unabhängig.

H_1 : Es besteht ein Zusammenhang zwischen den beiden Merkmalen.

Im Spezialfall zweier, z.B. wie in der Interviewstudie dichotom kodierter Variablen, lassen sich diese in einer 2×2 -Tabelle anordnen und die darin eingetragenen Häufigkeiten sind die sich aus den Daten ergebenden. Beim χ^2 -Test werden nun erwartete Häufigkeiten e_{ij} für jede Zelle in Zeile i und Spalte j der Tabelle berechnet als [19, S. 89]

$$e_{ij} = \frac{\text{Zeilensumme } i \cdot \text{Spaltensumme } j}{N}.$$

Die χ^2 -Teststatistik vergleicht folgendermaßen die beobachteten Zellenwerte b_{ij} mit den erwarteten Häufigkeiten e_{ij} :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \frac{(b_{ij} - e_{ij})^2}{e_{ij}}.$$

Ein $\chi^2 \neq 0$ spricht nun für einen Zusammenhang zwischen den Variablen. Wird der χ^2 -Test statistisch signifikant, so kann die Nullhypothese demnach zugunsten der Alternativhypothese verworfen werden. Wir betrachten ein **Beispiel**: In der Interviewstudie sollen die Vorstellungen der Lernenden zur Eigenschaft Ort in der Quantenphysik erhoben werden. Zwei der Auswertungskategorien sind diese:

1. Präparation: Lernende treffen Aussagen, die zum Ausdruck bringen, dass Quantenobjekte klassisch wohldefinierte Eigenschaften - wie etwa den Ort - nicht permanent besitzen, sondern, dass diese stattdessen präpariert werden müssen.
2. permLokal: Lernende treffen Aussagen, mit denen eine permanente Lokalisierung von Quantenobjekten explizit negiert wird.

Eine genauere Beschreibung der beiden Kategorien findet sich mit Ankerbeispielen im Kodierleitfaden zur Interviewstudie. Diesen findet man in Anhang G dieser Arbeit. Für den Moment wollen wir uns ansehen, wie viele Schülerinnen und Schüler Aussagen getroffen haben, die den beiden Kategorien zugeordnet werden konnten. Dies erkennt man gut in einer 2×2 -Tabelle:

| | | Präparation | |
|-----------|---|-------------|----|
| | | 0 | 1 |
| permLokal | 0 | 6 | 9 |
| | 1 | 0 | 10 |

Tabelle 7.2: 2×2 -Tabelle für das Beispiel der Vorstellungen zur Eigenschaft Ort.

Anhand der Tabelle mag man geneigt sein, einen Zusammenhang zu erkennen: trifft ein Lernender Aussagen, die der einen Kategorie zugeordnet sind, so oft auch solche Aussagen, die der anderen angehören (10 Fälle). Auch werden in 6 Fällen keine Aussagen getroffen, die irgendeiner der beiden Kategorien zugeordnet werden. Aber auch neun Lernende sagen zwar etwas im Sinne der Präparation, lehnen aber die permanente Lokalisierung von Quantenobjekten nicht explizit ab. Gibt es nun eine Abhängigkeit zwischen beiden Vorstellungen oder sind diese statistisch unabhängig? Dies kann man statistisch mittels des χ^2 -Tests klären. Man liest zunächst mit den Bezeichnungen von oben ab: $b_{11} = 6$, $b_{12} = 9$, $b_{21} = 0$, $b_{22} = 10$. Außerdem berechnet man die erwarteten Häufigkeiten:

- $e_{11} = \frac{15 \cdot 6}{25} = 3.6$
- $e_{12} = \frac{15 \cdot 9}{25} = 11.4$
- $e_{21} = \frac{10 \cdot 6}{25} = 2.4$

- $e_{22} = \frac{10 \cdot 19}{25} = 7.6$

Wir erhalten damit

$$\begin{aligned}\chi^2 &= \frac{(6 - 3.6)^2}{3.6} + \frac{(9 - 11.4)^2}{11.4} + \frac{(0 - 2.4)^2}{2.4} + \frac{(10 - 7.6)^2}{7.6} = \\ &= 1.6 + 0.51 + 2.4 + 0.76 \\ &= 5.27.\end{aligned}$$

Der kritische χ^2 -Wert zum Niveau $\alpha = 0.05$, also $1 - \alpha = 0.95$, kann in Tafelwerken nachgelesen werden zu $\chi_{\text{krit}}^2(df = 1, 1 - \alpha) = 3.84$. Weil $\chi^2 = 5.27 > 3.84$ ist, wird die Nullhypothese verworfen: In der Tat kann demnach davon ausgegangen werden, dass zwischen den beiden Vorstellungen eine Abhängigkeit besteht. Wir werden in Kapitel 11 zur Interviewstudie solche und ähnliche Ergebnisse im Detail diskutieren.

Zur Einschätzung der Stärke des Zusammenhangs zweier dichotomer Variablen wird die Verwendung des φ -Koeffizienten vorgeschlagen:

$$\varphi = \sqrt{\frac{\chi^2}{n}},$$

wobei n die Zahl der Beobachtungen und χ^2 der Chi-Quadrat-Wert ist [41, S. 80]. φ kann nach [42] interpretiert werden, wie eine Korrelation, d.h.

- $\varphi \geq 0.1$: schwacher Effekt
- $\varphi \geq 0.3$: mittlerer Effekt
- $\varphi \geq 0.5$: starker Effekt.

7.2.2.2 Die Clusteranalyse

Die Clusteranalyse eignet sich als exploratives Verfahren zur Unterteilung der Probandinnen und Probanden in homogene Gruppen - Cluster genannt - anhand ihrer Merkmalsausprägungen [51, S. 624], wobei sich die Cluster untereinander voneinander abgrenzen. Im Kontext der Interviewstudie erlaubt die Clusteranalyse die Bildung von Typen mit ähnlichen Vorstellungen zu Aspekten der modernen Quantenphysik. Die Kodierung von Interviewdaten mittels des in Anhang G aufgeführten Kodierleitfaden führt auf dichotome Daten (vgl. Beschreibung in 7.2.2.1), die clusteranalytisch untersucht werden können. Jedem Probanden und jeder Probandin wird gemäß seiner Merkmalsausprägungen $x_i \in \{0, 1\}$ in den Kategorien $i \in \{1, \dots, p\}$ ein Vektor im \mathbb{R}^p zugeordnet. Ferner wird auf dem Raum \mathbb{R}^p der Merkmalsausprägungen eine Metrik d definiert, die ganz unterschiedlich aussehen kann. Im einfachsten Fall kann man an die euklidische Metrik denken, die auf einen intuitiven Längenbegriff führt. Greift man die einzelnen Probanden nun, wie oben beschrieben, anhand ihrer Merkmalsausprägungen als Punkte $(x_1, \dots, x_p)^T$ im Raum der Merkmalsausprägungen \mathbb{R}^p auf, so kann man mit dieser - vorher festzulegenden Metrik d - „Abstände“ zwischen diesen Probanden festlegen.



Ein bezüglich der Metrik d kleiner Abstand zwischen zwei Probanden spricht dafür, dass diese ähnliche Merkmalsausprägungen besitzen, also inhaltlich auf gleiche Fragen ähnlich geantwortet haben. Entsprechend unterscheiden sich Probanden mit großem Abstand in ihren Merkmalsausprägungen.

Welche Metrik man wählt, hängt unter anderem vom Skalenniveau der Daten ab und einen Überblick über die gängigsten Metriken für Clusteranalysen gibt [41, S. 195].

Bei hierarchisch-agglomerativen Clusteranalysen startet das Verfahren, indem jeder Vektor mit Merkmalsausprägungen $(x_1, \dots, x_p)^T$ - also einfach gedacht jeder Proband - ein Cluster bildet, d.h. es gibt für n Probanden n Cluster [41, S. 190]. Mit Hilfe der zuvor festgelegten Metrik, werden dann im ersten Schritt die beiden Cluster $\{\mathbf{a}\}$ und $\{\mathbf{b}\}$ zu einem Cluster $\{\mathbf{a}, \mathbf{b}\}$ fusioniert, die die kleinste Distanz $d(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ voneinander haben. Vom zweiten Schritt an spielt nun offensichtlich nicht nur die Distanz zwischen Vektoren von Merkmalsausprägungen - also „zwischen“ den Probanden - eine Rolle, sondern auch zwischen den Clustern selbst. Dazu existiert eine Reihe von Fusionierungsalgorithmen, auch Linkage-Methoden genannt. Diese legen fest, welche Punkte innerhalb von Clustern verwendet werden für die Bestimmung von Abständen [41, S. 197]. Für einen Überblick über mögliche Fusionierungsalgorithmen sei auf Arbeiten von [48] oder [41] verwiesen.

Eine bekannte solche Linkage-Methode ist die von Ward [199]. Dieses Verfahren bezieht in die Clusterbildung nicht nur die Distanz zwischen den gebildeten Clustern mit ein. Stattdessen werden mit diesem Verfahren Cluster unter Berücksichtigung einer zu optimierenden Nebenbedingung gebildet [48]. Ward's Linkage-Methode fusioniert Cluster standardmäßig unter Minimierung „aller Cluster-spezifischen Fehlerquadratsummen“ [41, S. 199]. Verschiedene Arbeiten, z.B. [139] setzen daher die euklidische Metrik zur Anwendung dieser Methode voraus. Bereits seit längerem ergeben Untersuchungen mit kategoriale Daten mit der Ward-Methode und der Manhattan Distanz aber plausible Ergebnisse: In der Arbeit [199] wurde mathematisch begründet, dass die Anwendung der Wards Linkage-Methode unter Verwendung der Manhattan-Metrik methodisch möglich ist.

Im hier vorgestellten Fall lagen nach der Kategorisierung dichotom kodierte Variablen vor, und die gewählte Metrik war die Manhattan Distanz:

$$d(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \sum_{i=1}^p |a_i - b_i|,$$

wobei $\mathbf{a} = (a_1, \dots, a_p)$, $\mathbf{b} = (b_1, \dots, b_p) \in \mathbb{R}^p$ die Vektoren mit den p Merkmalsausprägungen a_i, b_i ($i \in \{1, \dots, p\}$) zweier Probanden sind [199]. Ergänzt werden solche hierarchischen Clusteranalysen häufig durch sogenannte K-means-Clusteranalysen. Hierbei wird die zu ermittelnde Zahl an Clustern vorher festgelegt. Jeder Proband wird dann einem dieser Cluster zugeordnet. Dieses Verfahren kam in dieser Studie zum Einsatz, nachdem mittels Wards-Methode die Zahl der Cluster gefunden wurde. Für Details siehe [197].

KAPITEL 8

Affektive und kognitive Lernermerkmale

„Il piacere più nobile è la gioia della
comprensione.“

- Leonardo da Vinci

Einordnung in den Kontext der Arbeit

Die Stichprobe der summativen Evaluation wurde in Kapitel 7 umfassend beschrieben. Außerdem stellten wir im letzten Kapitel Informationen über alle verwendeten statistischen Methoden bereit, die zur Datenanalyse verwendet wurden. In den folgenden Kapiteln werden nun die Ergebnisse der summativen Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts vorgestellt. Wir unterstreichen die Bedeutung der Schülerperspektive und stellen dazu in diesem Kapitel die Studienergebnisse zu affektiven Lernermerkmalen an den Anfang. Wir zeigen, wie das Erlanger Unterrichtskonzept von Lernenden angenommen wird und evaluieren, wie die fachspezifischen Testergebnisse mit kognitiven Lernermerkmalen zusammenhängen. Erst in den Folgekapiteln werden Lernzuwachs und Vorstellungen der Lernenden präsentiert.

8.1 Affektive Lernermerkmale

8.1.1 Interesse an Physik

Das Interesse für Physik wurde mit der im Abschnitt 4.2.1 vorgestellten Skala bestehend aus sechs Items (1 = stimmt gar nicht, ..., 5 = stimmt völlig) vor und nach der Intervention erhoben. Es ergibt sich folgendes Ergebnis:

| | <i>N</i> | Interesse an Physik (prä) | | Interesse an Physik (post) | |
|----------|----------|---------------------------|-----------|----------------------------|-----------|
| | | <i>m</i> | <i>SD</i> | <i>m</i> | <i>SD</i> |
| männlich | 83 | 3.65 | 0.84 | 3.63 | 0.87 |
| weiblich | 87 | 3.22 | 0.88 | 3.08 | 0.92 |

Tabelle 8.1: Interesse an Physik vor und nach der Intervention nach Geschlecht.



Wir wollen im Folgenden häufig geschlechterspezifische Unterschiede mittels Signifikanztest untersuchen. Dazu verwenden wir t-Tests mit unabhängigen Stichproben. Dafür müssen allerdings einige Voraussetzungen erfüllt sein, wie bereits in Abschnitt 7.2.1.3 erläutert. Diese Bedingungen werden an diesem Beispiel einmal ausführlich geprüft. Um die Lesbarkeit sicherzustellen, wird dies für nachfolgende Analysen nicht separat berichtet. War eine der Bedingungen nicht erfüllt, so erkennt man das daran, dass in dieser Arbeit dann die Ergebnisse entsprechender nicht-parametrischer Verfahren berichtet werden.

Die Voraussetzungen für einen t-Test mit unabhängigen Stichproben sind erfüllt, denn:

1. Die abhängige Variable - die Änderung des Interesses an Physik - kann als intervallskaliert aufgefasst werden (vgl. die Diskussion über Ratingskalen in Kapitel 7.2.1).
2. Die Erhebung des Interesses an Physik fand für Schülerinnen und Schüler unterschiedlichen Geschlechts unabhängig voneinander statt.
3. Die Änderung des Interesses an Physik kann als normalverteilt angenommen werden, wie man mittels Kolmogorov-Smirnov-Test sieht ($Z = 1.19$, $p = 0.10$).
4. Die Varianzen der beiden Stichproben können als homogen angesehen werden. Dies prüft man mittels des Levene-Tests: $F(1, 158) = 0.55$, $p = 0.46$.

Die Änderung des Interesses der Jungen an Physik unterscheidet sich nicht statistisch signifikant von der Änderung des Interesses an Physik der Mädchen ($t = 0.99$, $p = 0.33$). Unabhängig vom Geschlecht kann das Interesse daher als stabil erachtet werden, genau wie die Theorie erwarten lässt: „Interesse ist in der Regel [...] eine übersituative (generalisierte) und zeitlich relativ stabile Person-Gegenstands-Relation [...]“ [105, S. 325].

Das Interesse an Quantenphysik, das zu Beginn des Fragebogens auf einer sechsstufigen Ratingskala erhoben wurde, und auch das physikbezogene Selbstkonzept korrelieren signifikant mit den Ergebnissen der Skala zum Interesse an Physik:

| | Interesse an Physik (prä) | Interesse an Physik (post) |
|----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| Interesse an Quantenphysik | 0.67*** | 0.69*** |
| Selbstkonzept Physik | 0.51*** | 0.50*** |

Tabelle 8.2: Korrelationen des Interesses an Quantenphysik und der Skala zum *Selbstkonzept Physik* zur Skala *Interesse an Physik* vor und nach der Intervention.

8.1.2 Interesse am Experiment im Physikunterricht

Das Interesse für das Experimentieren im Physikunterricht wurde mit der im Abschnitt 4.2.1 vorgestellten Skala bestehend aus neun Items vor und nach der Intervention erhoben. Es ergibt sich folgendes Ergebnis:

| | Interesse am Experimentieren (prä) | | | Interesse am Experimentieren (post) | |
|----------|------------------------------------|----------|-----------|-------------------------------------|-----------|
| | <i>N</i> | <i>m</i> | <i>SD</i> | <i>m</i> | <i>SD</i> |
| männlich | 83 | 3.80 | 0.64 | 3.80 | 0.69 |
| weiblich | 87 | 3.30 | 0.73 | 3.25 | 0.79 |

Tabelle 8.3: Interesse am Experimentieren im Physikunterricht vor und nach der Intervention nach Geschlecht.

Das Interesse am Experimentieren im Physikunterricht ist bei Jungen etwas höher als bei Mädchen. Die Veränderung des Interesses am Experimentieren wird zwischen den beiden Erhebungszeitpunkten gemäß eines t-Tests für unabhängige Stichproben nicht signifikant ($t = 0.61$, $p = 0.54$), es gibt also keine Indizien für geschlechterspezifische Unterschiede. Das Interesse an Quantenphysik, das physikbezogene Selbstkonzept, sowie das Interesse am Fach Physik korrelieren signifikant mit den Ergebnissen der Skala zum Interesse am Experimentieren in Physik:

| | Interesse an Quantenphysik | Selbstkonzept Physik | Interesse an Physik (prä) | Interesse an Physik (post) |
|-------------------------------------|----------------------------|----------------------|---------------------------|----------------------------|
| Interesse am Experimentieren (prä) | 0.32*** | 0.25** | 0.56*** | 0.58*** |
| Interesse am Experimentieren (post) | 0.40*** | 0.35*** | 0.59*** | 0.68*** |

Tabelle 8.4: Korrelationen des verschiedenen Interessensskalen und der Skala zum Selbstkonzept Physik.

8.1.3 Aktuelles Interesse an Physik

Mit der aus neun Items bestehenden Skala zum aktuellen Interesse an Physik wurde die Meinung der Schülerinnen und Schüler über die Unterrichtsstunden der Intervention zum Postzeitpunkt erhoben, wieder auf der oben vorgestellten fünfstufigen Ratingskala.

| | Aktuelles Interesse an Physik | |
|----------|-------------------------------------|-----------|
| | <i>m</i> | <i>SD</i> |
| männlich | 3.69 | 0.75 |
| weiblich | 3.20 | 0.83 |

Tabelle 8.5: Aktuelles Interesse an Physik nach Geschlecht.

Man sieht, dass der Mittelwert für die Jungen leicht über dem der Mädchen liegt. Für beide Geschlechter liegt eine Tendenz zum positiven Urteil vor ($m > 3.00$). Mittels t-Test für unabhängige Stichproben wird der geschlechterspezifische Unterschied als statistisch signifikant identifiziert ($t = 3.96, p < 0.001$). Die nachfolgende Tabelle zeigt Korrelationen der Skala zum aktuellen Interesse an Physik mit den Änderungen des Interesses an Physik (Δ Interesse) und den Änderungen des Interesses am Experiment im Physikunterricht (Δ Experiment):

| | Δ Interesse | Δ Experiment |
|----------------------------------|--------------------|---------------------|
| Aktuelles Interesse an Physik | 0.35*** | 0.38*** |

Tabelle 8.6: Korrelationen der Skala zum aktuellen Interesse an Physik mit Δ Interesse und Δ Experiment. Schülerinnen und Schüler, die ein höheres aktuelles Interesse an Physik haben - die Intervention also positiver bewerteten - zeigen einen tendenziell höheren Zuwachs in ihrem Interesse an Physik und am Experiment im Physikunterricht.

Das aktuelle Interesse wurde auch während der Intervention zu vier Zeitpunkten mit Hilfe der Smileyabfrage themenspezifisch erhoben. Damit kann eingeschätzt werden, wie die Schülerinnen und Schüler die einzelnen Unterrichtsstunden der Intervention auf affektiver Ebene bewerten. In Kapitel vier dieser Arbeit wurde bereits mittels signifikanter Korrelationen zwischen den Ergebnissen der Smileybefragung und der Skala zum aktuellen Interesse an Physik unterstrichen, dass dies ein sinnvolles und hinreichend valides Instrument darstellt. Die Schülerinnen und Schüler bewerteten unmittelbar nach jeder Unterrichtsstunde auf einer dreistufigen Smiley-Skala, wie interessant sie den zurückliegenden Unterricht fanden.

8.2. KOGNITIVE LERNERMERKMALE

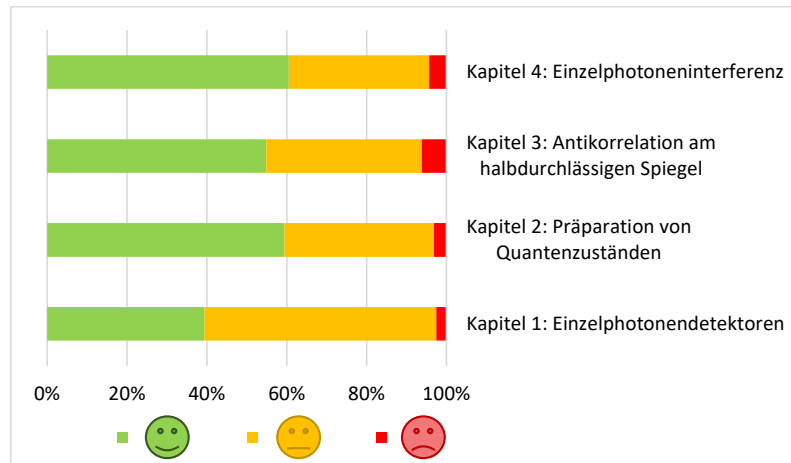


Abbildung 8.1: Ergebnisse der Smileybefragung im Überblick.

Alle Stunden wurden von der großen Mehrheit der Befragten als positiv oder mittelmäßig eingeschätzt. Der Anteil der Schülerinnen und Schüler, die die Stunden als (sehr) interessant beurteilten, lag in allen Stunden bei ungefähr 40% oder höher. Die Kapitel „Präparation von Quantenzuständen“ und „Einzelphotoneninterferenz“ wurden von den Lernenden am besten bewertet, während die erste Unterrichtsstunde zu „Einzelphotonendetektoren“ etwas weniger positive Ratings erhält.

8.2 Kognitive Lernermerkmale

In Kapitel 4.2.2 dieser Arbeit wurde begründet, warum der LGTV 5-12+ als Instrument zur Erhebung von Leseverständnis und Lesegenauigkeit eingesetzt wurde: In der Pilotstudie I (vgl. Kapitel 5) und in der Expertenbefragung (vgl. Kapitel 6) zeigt sich, dass die entwickelten Distraktoren im Fachwissenstest als sehr authentisch empfunden wurden. Das bedeutet einerseits, dass genauer zwischen Wissenden und Unwissenden differenziert werden kann. Es hat aber zu Bedenken geführt, ob nicht zu einem erheblichen Anteil Lesekompetenzen getestet würden, was die Validität des Verfahrens deutlich mindern würde. Aus diesem Grund sollen in diesem Kapitel die Korrelationen zwischen den Testinstrumenten zu kognitiven Lernermerkmalen und den Testscores im fachspezifischen Test berichtet werden. Für den Lesetest erhält man keinerlei bedeutender Korrelationen, insbesondere wird keine statistisch signifikant:

| | Leseverständnis | Lesegenauigkeit |
|----------------|-----------------|-----------------|
| Prätest | 0.08 | -0.19 |
| Posttest | 0.12 | 0.08 |
| Follow-Up-Test | 0.06 | 0.01 |

Tabelle 8.7: Korrelationen zwischen dem Leseverständnis und der Lesegenauigkeit - erhoben mit dem LGTV 5-12+ - und den Testscores im Fachwissenstest zum deklarativen Wissen in Quantenoptik. Keine der Korrelationen wird auf dem Niveau von 0.05 statistisch signifikant.

Auf Grundlage dieser Ergebnisse gibt es keinerlei Argumente dafür, dass der hier eingesetzte Fachwissenstest Lesekompetenzen erheben würde. Dies spricht für die diskriminante Validität des Verfahrens [177, S. 116].

Anders ist es für die Erhebung kognitiver Fähigkeiten mittels der Subskala Q2 des etablierten KFT 4-12+ R (vgl. Kapitel 4). Natürlich erwartet man eine Korrelation zwischen der kognitiven Fähigkeit der Schülerinnen und Schüler und den Testscores - weniger für den Prätest, weil es hier primär um Vorwissen geht, in jedem Fall aber für den Posttest. Die nachfolgende Tabelle zeigt die entsprechenden Korrelationen im Überblick:

| | Q2-Skala KFT |
|----------------|--------------|
| Prätest | 0.13* |
| Posttest | 0.22** |
| Follow-Up-Test | 0.10 |

Tabelle 8.8: Korrelationen zwischen den kognitiven Fähigkeiten - erhoben mit der Subskala Q2 des KFT 4-12+ R - und den Testscores im Fachwissenstest zum deklarativen Wissen in Quantenoptik. Der Testscore im Follow-Up-Test korreliert nicht signifikant mit dem Score in der Q2-Skala auf einem 5%-Niveau.

Diese Ergebnisse sprechen für die konvergente Validität des Verfahrens [177, S. 115f].

8.3 Zusammenfassung

Man kann die Ergebnisse dieses Kapitels knapp wie folgt zusammenfassen:

- Durch die Intervention wird keine statistisch signifikante Änderung des Interesses an Physik oder am Experiment im Physikunterricht bewirkt, aber die Mittelwerte sinken von Prä- zu Posterhebung leicht. Dies ist im Einklang mit der Interessensforschung [105].
- Es zeigen sich statistisch signifikante Korrelationen zwischen dem Interesse an Physik und dem Interesse an Quantenphysik, die zum Teil sogar hoch signifikant ausfallen.

8.3. ZUSAMMENFASSUNG

- Ohne die Smiley-Abfrage überzubewerten, kann man unter Hinzunahme der Skala zum aktuellen Interesse sagen:
 1. Schülerinnen und Schüler finden moderne quantenoptische Aspekte (Präparation von Quantenzuständen, Antikorrelation am halbdurchlässigen Spiegel), wie sie im Erlanger Unterrichtskonzept vermittelt werden, überwiegend interessant.
 2. Technische oder messmethodische Details werden nicht als uninteressant empfunden: Über 90% bewerteten die Unterrichtsstunde zu Einzelphotonendetektoren als mindestens mittelmäßig interessant und fast 60% der Befragten gaben an, dass sie die Unterrichtsstunde zur Präparation von Quantenzuständen besonders interessant fanden.
- Die Daten geben keinen Grund zur Annahme, dass der Fachwissenstest zur Quantenoptik Lesekompetenzen erheben würde. Dies wird unterstrichen durch eine Korrelationsanalyse mit den Ergebnissen des LGTV 5-12+. Alle Korrelationen sind klein und nicht statistisch signifikant.

KAPITEL 9

Entwicklung des deklarativen Wissens zur Quantenoptik

„Für ein Individuum kann es keine Frage sein, dass wenige klare Begriffe mehr wert sind als viele verworrene.“

- Charles S. Peirce

Einordnung in den Kontext der Arbeit

Das Studiendesign und die verwendeten Erhebungsinstrumente wurden nach und nach vorgestellt, die Stichprobe wurde detailliert erläutert und auf affektive Lernmerkmale - erhoben vor und nach der Intervention - wurde eingegangen. In den nächsten drei Kapiteln werden nacheinander zunächst die Ergebnisse zum fachspezifischen Lernzuwachs bezogen auf das deklarative Wissen (dieses Kapitel), die Ergebnisse zum Vorstellungsfragebogen (Kapitel 10), sowie die Ergebnisse der Interviewstudie (Kapitel 11) vorgestellt, bevor im Kapitel 12 die Triangulation folgt.

Wir wollen zu Beginn einen Überblick über den gemessenen Lernzuwachs der Schülerinnen und Schüler geben, die im Rahmen der Hauptstudie mit dem Erlanger Unterrichtskonzept zur Quantenoptik in die Quantenphysik eingeführt wurden. Im Anschluss wollen wir eine Auswertung auch

- geschlechterspezifisch,
- nach Leistungsgruppen, also hinsichtlich Fragen wie „Wie ist der Lernzuwachs in Abhängigkeit vom fachspezifischen Prätestergebnis?“ und
- inhaltspezifisch, also hinsichtlich der Frage „In welchen Themenbereichen lernen die Lernenden besonders dazu?“

skizzieren. Zunächst beginnen wir aber mit deskriptivanalytischen Kennzahlen. Teile dieses Kapitels sind bereits veröffentlicht in [15].

9.1 Itemschwierigkeiten, Trennschärfe und interne Konsistenz

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Anteile richtig gelöster Testitems zu den drei Messzeitpunkten. Die Werte der Itemschwierigkeiten im Prätest fallen sehr niedrig aus ($m = 0.14$, $SD = 0.14$), was prinzipiell dafür spricht, dass die Items für die Stichprobe im Vor-test zu schwer sind. Vor dem Hintergrund, dass die Schülerinnen und Schüler keinerlei Vorkenntnisse zur Quantenphysik besitzen, ist das aber kein Wunder und methodisch auch unproblematisch. Nachdem mit dem Prätest nämlich nur das Vorwissen der Schülerinnen und Schüler kontrolliert werden soll, um einen Lernzuwachs feststellbar zu machen, sollen die Kenntnisse der Schülerinnen und Schüler nicht differenziert damit erfasst werden.



Man denke darüber hinaus bei der Einordnung der Lösungswahrscheinlichkeiten daran, dass zur Minimierung des Rateeinflusses ein Punkt im Test für alle Items nur vergeben wird, wenn erstens die richtige Antwortmöglichkeit angekreuzt wird und sich der Proband darüber hinaus mindestens „sicher“ war.

Erwartungsgemäß fallen die Itemschwierigkeiten etwas höher aus (d.h. der Anteil richtig gelöster Items steigt), wenn man auch solche richtigen Antworten mit einem Punkt kodiert, bei denen die Schülerinnen und Schüler unentschieden oder unsicher waren und nur diejenigen herausfiltert, bei denen die Probanden angeben geraten zu haben. Für beide Fälle entnimmt man aber nachfolgender Tabelle: alle mittleren Itemschwierigkeiten für Post- und Follow-Up-Test liegen im mittleren Bereich, sodass der Test für die Stichprobe angemessen schwierig scheint.

| | Punkt ab „sicher“ | | | Punkt ab „unsicher“ | | |
|----------------------------|-------------------|------|-----------|---------------------|------|-----------|
| | Prä | Post | Follow-Up | Prä | Post | Follow-Up |
| mittlere Itemschwierigkeit | 0.14 | 0.41 | 0.34 | 0.26 | 0.54 | 0.51 |

Tabelle 9.1: Anteil richtig gelöster Items nach Erhebungszeitpunkt.

Was man aus dieser Tabelle ebenfalls bereits erkennen kann: Der Anteil richtig gelöster Items steigt von Prä- zu Posttest deutlich an, um dann zum Follow-Up-Test wieder leicht abzusinken. Diese beiden Eindrücke sollen in den nächsten Abschnitten dieses Kapitels etwas genauer untersucht werden.

Um die psychometrischen Kennwerte aus der Pilotstudie und damit die Qualität des Tests - berichtet in Kapitel 6 - auch für die Hauptstudie zu bestätigen, wurden die Itemtrennschärfen und Cronbach's Alpha für den Follow-Up-Test auch noch einmal für die Stichprobe der Hauptstudie berechnet. Dabei konnten die Ergebnisse der Pilotstudie repliziert werden:

| Cronbach's Alpha | | mittlere Trennschärfe | |
|------------------|-------------|-----------------------|-------------|
| Pilotstudie | Hauptstudie | Pilotstudie | Hauptstudie |
| 0.78 | 0.78 | 0.40 | 0.41 |

Tabelle 9.2: Cronach's Alpha und mittlere Trennschärfe des Testinstruments.

9.2 Prä-, Post- und Follow-Up-Testergebnisse: Lernzuwachs

Mittels des Vergleichs der erzielten mittleren Testscores zu den drei Testzeitpunkten soll die Lernförderlichkeit des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik im Bezug auf das deklarative Wissen eingeschätzt werden. Der aus 13 Items bestehende Test wurde dichotom kodiert, d.h. es konnten maximal 13 Punkte erreicht werden.

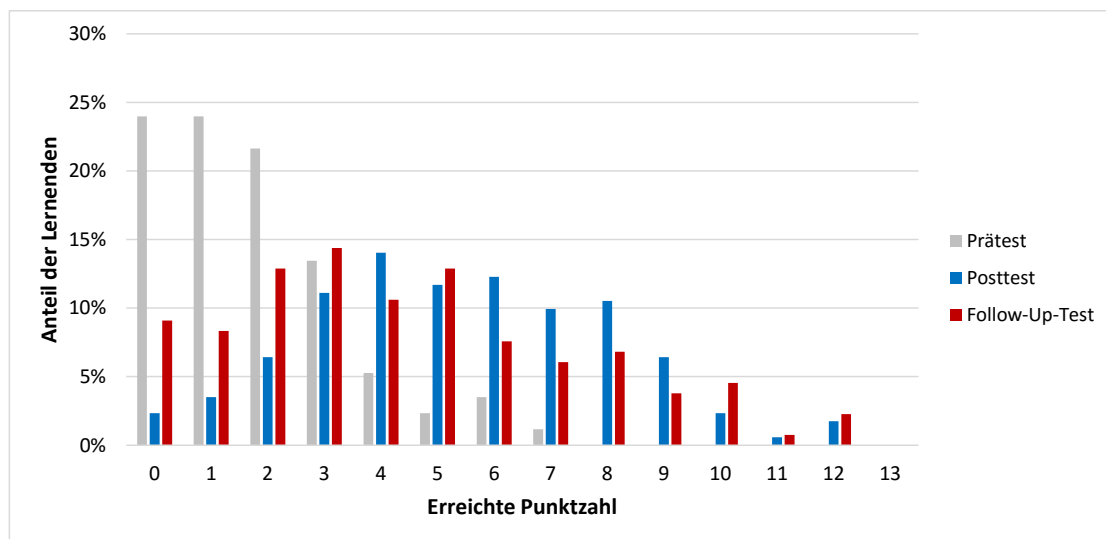


Abbildung 9.1: Histogramm zur erreichten Punktzahl je Erhebungszeitpunkt.

Abbildung 9.1 zeigt, dass sich die mittlere Punktzahl von Prä- zu Posttest deutlich erhöht. Die Verteilungen der erreichten Punktzahlen in Post- und Follow-Up-Test sehen auf den ersten Blick ähnlich aus, aber ein Blick auf deskriptivstatistische Kennzahlen ($m \pm SD$) zeigt einen kleinen Rückgang in der mittleren erreichten Punktzahl zum dritten Erhebungszeitpunkt:

9.2. PRÄ-, POST- UND FOLLOW-UP-TESTERGEBNISSE: LERNZUWACHS

| | Prätest | Posttest | Follow-Up-Test |
|-----------|-------------|-------------|----------------|
| Testscore | 1.69 ± 1.65 | 5.08 ± 2.51 | 4.70 ± 3.11 |

Tabelle 9.3: Mittlere Punktzahl zu den Erhebungszeitpunkten.

Weil die Änderung der Punktzahlen nicht normalverteilt ist, wird zu Untersuchung der Unterschiede in der mittleren erreichten Punktzahl auf statistische Signifikanz auf das nicht-parametrische Analogon zur ANOVA, den Friedman-Test zurückgegriffen (vgl. Kapitel 7.2.1). Der Friedman-Test wird statistisch höchst signifikant ($\chi^2(120, 2) = 151.27$, $p < 0.001$) und ein Bonferroni-korrigierter Post-Hoc Test klärt auf, dass

- der Lernzuwachs von Prä- zu Posttesterhebung statistisch signifikant wird ($p < 0.001$) und zwar mit Effektstärke $r = 0.11$.
- der Rückgang in der mittleren Punktzahl von Post- zu Follow-Up-Erhebung nicht statistisch signifikant wird ($p = 0.261$). Vor dem Hintergrund dieser Erhebung scheint man also von einen nachhaltigen Lernzuwachs im deklarativen Wissen zur Quantenoptik ausgehen zu können, der durch die Intervention gefördert wird.

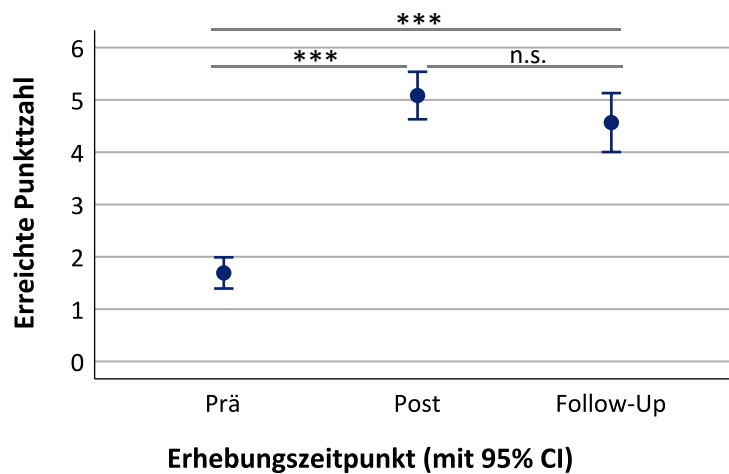


Abbildung 9.2: Mittlere Punktzahl zu drei Messzeitpunkten mit 95%-Konfidenzintervallen. Abbildung bereits publiziert in [15].



Man mag diesem Befund entgegen, dass ja nichts anderes zu erwarten sei. Wissen Schülerinnen und Schüler vor einer Intervention nichts über ein Thema, so sollten sie danach doch etwas mehr Kenntnisse dazu haben. Dieses Kapitel soll daher auch nicht zeigen, wie gut Schülerinnen und Schüler mit dem neuen Konzept Quantenoptik lernen. Dass aber überhaupt ein messbarer Lerneffekt erzielt wird, ist notwendige Voraussetzung dafür, dass überhaupt Verständnis oder adäquate Vorstellungen gefördert werden können. Nachdem es sich beim hier vorgestellten Konzept um einen begrifflich, technisch und experimentell ganz neuen Zugang zu einem anspruchsvollen Thema der Schulphysik handelt, erscheint dieser Nachweis eines Lernzuwachses fundamental.

9.3 Geschlechterspezifische Analyse des Lernzuwachses

Die Frage, ob Mädchen vom Unterricht profitieren, wie er durch das Erlanger Konzept vorgeschlagen wird, ist zentral: Die Förderung von Mädchen im Physikunterricht ist ein anerkanntes Ziel der Physikdidaktik. Analysiert man die Testergebnisse unter Berücksichtigung des Geschlechts der Lernenden, so zeigt sich zunächst, dass die Jungen zu allen Erhebungszeitpunkten besser abschneiden, als die Mädchen:

| | Testscore Prätest | Testscore Posttest | Testscore Follow-Up-Test |
|----------|-------------------|--------------------|--------------------------|
| männlich | 2.45 ± 1.77 | 6.25 ± 2.42 | 5.33 ± 3.04 |
| weiblich | 1.10 ± 1.18 | 4.53 ± 2.53 | 3.70 ± 2.86 |

Tabelle 9.4: Mittlere Punktzahl zu den Erhebungszeitpunkten. Es zeigt sich in allen Erhebungen ein signifikanter Unterschied im erreichten Testscore von Jungen und Mädchen ($t_{\text{Prä}}(160) = 5.70, p < 0.001, d = 0.90$; $t_{\text{Post}}(157) = 4.40, p < 0.001, d = 0.69$; $t_{\text{Follow-Up}}(130) = 3.15, p < 0.01, d = 0.55$).

Ermutigend erscheint: der absolute Lernzuwachs von Prä- zu Posterhebung ist für die Jungen ($m = 3.75, SD = 2.02$) und die Mädchen ($m = 3.28, SD = 2.21$) ähnlich hoch und der Unterschied im mittleren Lernzuwachs von 0.47 Punkten wird statistisch nicht signifikant ($t(151) = 1.35, p = 0.178$).



An dieser Stelle sei noch einmal daran erinnert, dass die Vergabe eines Punkts im Test daran gebunden war, dass erstens die richtige Antwortmöglichkeit angekreuzt wurde, und zweitens, dass die Schülerinnen und Schüler auf einer fünfstufigen Skalaangaben bei der Wahl der Antwort mindestens „sicher“ zu sein. Damit unterschätzt man zunächst einmal den absoluten Lernzuwachs, was einer konservativen Rechnung entspricht. Man filtert damit aber natürlich auch richtige Antworten von solchen Schülerinnen und Schülern heraus, die zwar richtig lagen, sich aber nicht zugetraut haben, anzugeben, dass sie „sicher“ waren.

9.3. GESCHLECHTERSPEZIFISCHE ANALYSE DES LERNZUWACHSES

Lässt man diese Klausel bei der Auswertung außen vor, d.h. vergibt man Punkte im Test immer dann, wenn die richtige Antwort angekreuzt wurde, solange die Befragten nicht von sich aus auf der Ratingskala angeben, dass sie „geraten“ haben, so zeigt sich: Der geschlechterspezifische Unterschied im Prätest bleibt bestehen, aber die Mädchen holen auf und im Posttest ist der Unterschied nicht mehr statistisch signifikant:

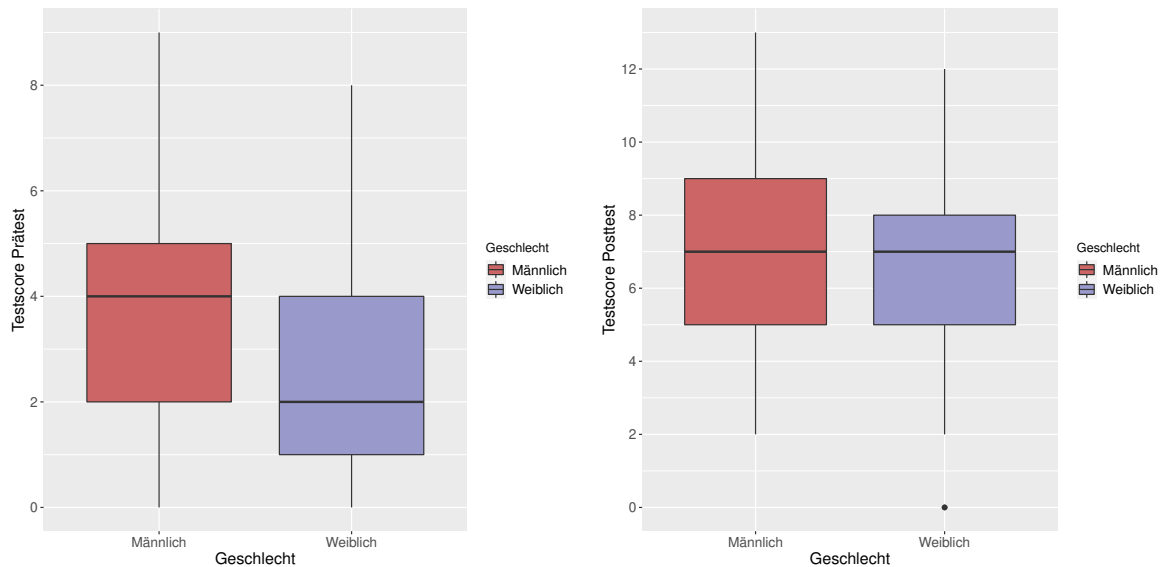


Abbildung 9.3: Boxplots für den Testscore im Prä- (links) und Posttest (rechts) zeigen: Obwohl Mädchen geringeres Vorwissen haben, schneiden sie im Posttest genauso gut ab, wie Jungen, holen also auf. Der Unterschied wird dann nicht mehr statistisch signifikant.

Zusammenfassend kann also im Bezug auf den geschlechterspezifischen Lernzuwachs folgendes festgestellt werden:

- Die Jungen sind den Mädchen im Vorwissen höchst signifikant überlegen ($t_{Prä}(160) = 5.70, p < 0.001, d = 0.90$).
- Die Unterschiede sind nach der Intervention im Posttest deutlich ausgeglichen: Bezieht man die Ankreuzsicherheit mit in die Kodierung ein, so bleibt ein signifikanter Unterschied bestehen. Filtert man nur geratene richtige Antworten heraus, so gleicht sich das aus: die Mädchen schließen dann im Posttest ähnlich gut ab, wie die Jungen¹.

¹Dieses Ergebnis repliziert die Ergebnisse anderer Studien, die ebenfalls alternative Unterrichtskonzepte mit einer überarbeiteten begrifflichen Struktur auf Lernwirksamkeit untersuchten [213].

9.4 Analyse nach Leistungsterzilen

Die Analyse des Lernzuwachses nach Leistungsterzilen ermöglicht es abzuschätzen, welchen Einfluss das Prätestergebnis auf den Lernzuwachs durch die Intervention hat. Dazu wurde die Stichprobe in Abhängigkeit der Prätestergebnisse der Schülerinnen und Schüler in drei Leistungsterzile unterteilt. Die nachfolgende Tabelle zeigt deskriptive Statistiken zum Lernzuwachs nach den Terzilen im Überblick:

Analyse des Lernzuwachses nach Leistungsterzilen

| | Unteres Terzil | Mittleres Terzil | Oberes Terzil |
|---|----------------|------------------|---------------|
| Prätestergebnis | 0,50 ± 0,50 | 2,38 ± 0,49 | 5,05 ± 1,07 |
| Prätestergebnis (ab „unsicher“) | 2,23 ± 1,78 | 3,87 ± 1,21 | 6,43 ± 1,43 |
| Interesse an Quantenphysik | 3,38 ± 1,35 | 2,83 ± 1,32 | 1,62 ± 0,87 |
| Absoluter Lernzuwachs | 3,51 ± 1,95 | 3,72 ± 2,25 | 3,00 ± 2,32 |
| Absoluter Lernzuwachs (ab „unsicher“) | 4,05 ± 2,35 | 3,53 ± 2,08 | 2,24 ± 2,51 |
| Relativer Lernzuwachs | 0,28 ± 0,16 | 0,35 ± 0,21 | 0,37 ± 0,29 |
| Relativer Lernzuwachs (ab „unsicher“) | 0,36 ± 0,21 | 0,38 ± 0,21 | 0,32 ± 0,38 |
| Posttestergebnis | 4,03 ± 2,09 | 6,10 ± 2,32 | 8,05 ± 2,38 |
| Posttestergebnis (ab „unsicher“) | 6,24 ± 2,08 | 7,41 ± 2,00 | 8,67 ± 2,35 |
| Follow-Up-Test-Ergebnis | 2,95 ± 2,50 | 5,68 ± 2,82 | 7,83 ± 3,13 |
| Follow-Up-Test-Ergebnis (ab „unsicher“) | 5,81 ± 2,65 | 7,61 ± 2,33 | 8,50 ± 3,20 |
| Sicherheit Prättest | 4,13 ± 0,57 | 3,40 ± 0,52 | 2,69 ± 0,41 |
| Sicherheit Posttest | 2,44 ± 0,62 | 1,93 ± 0,50 | 1,51 ± 0,34 |
| Sicherheit Follow-Up-Test | 2,94 ± 0,75 | 2,16 ± 0,65 | 1,92 ± 0,94 |

Abbildung 9.4: Analyse des Lernzuwachses nach Leistungsterzilen.

Man sieht deutlich, dass ein höherer **absoluter Lernzuwachs** durch die Intervention nicht auf ein höheres Vorwissen zurückzuführen ist, weil die Schülerinnen und Schüler im

9.5. PRÄDIKTOREN FÜR DAS POSTTESTERGEBNIS

unteren ($m = 3.51, SD = 1.95$) und mittleren Leistungsterzil ($m = 3.72, SD = 2.25$) - also mit schlechteren Vortestergebnissen - einen im Mittel höheren absoluten Lernzuwachs besitzen, als Schülerinnen im oberen Leistungsterzil ($m = 3.00, SD = 2.32$). Dieser Befund ändert sich auch nicht, wenn man nicht nur sicher und richtig gegebene Antworten, als Punkt kodiert (vgl. absoluten Lernzuwachs „ab unsicher“).

Der **relative Lernzuwachs** wird berechnet zu

$$\begin{aligned} \text{rel. Lernzuwachs} &= \frac{\text{absoluter Lernzuwachs}}{\text{möglicher absoluter Lernzuwachs}} \\ &= \frac{\text{absoluter Lernzuwachs}}{13 - \text{Prätestergebnis}}. \end{aligned}$$

Vor dem Hintergrund dieser Formel scheint es nicht überraschend, dass Schülerinnen und Schüler des oberen Terzils höhere relative Lernzuwächse ($m = 0.37, SD = 0.29$) besitzen, als ihre Mitschülerinnen und -schüler aus dem mittleren ($m = 0.35 \pm 0.21$) und dem unteren Leistungsterzil ($m = 0.28, SD = 0.16$) - umso weniger ist dies überraschend, wenn man zusätzlich mit in Betracht zieht, dass das Prätestergebnis signifikant mit dem Interesse an Quantenphysik korreliert ist ($r = -0.15, p < 0.05$).

Post- ($r = 0.52, p < 0.001$) und **Follow-Up-**Testergebnis ($r = 0.50, p < 0.001$) sind stark mit dem Vortestergebnis korreliert. Inwiefern das Prätestergebnis ein Prädiktor für das Posttestergebnis sein kann, soll im nächsten Abschnitt genauer geklärt werden, bevor auf die Ankreuzsicherheit Bezug genommen wird.

9.5 Prädiktoren für das Posttestergebnis

Die Frage inwiefern Vortestergebnis und andere Variablen das Posttestergebnis vorhersagbar machen, lässt sich mittels multipler linearer Regression klären. Für ein Regressionsmodell des fachspezifischen Testergebnisses zum Postzeitpunkt wurden die Physiknote, das Interesse an Quantenphysik, das Geschlecht, sowie das fachspezifische Prätestergebnis - also das Vorwissen - als unabhängige Variablen genutzt. Die Voraussetzungen für eine multiple Regression waren erfüllt und die Ergebnisse der Überprüfung sollen nachfolgend kurz skizziert werden:

- Die abhängige Variable ist intervallskaliert, die unabhängigen Variablen sind es bzw. können als solche aufgefasst werden [198, S. 68], wie in Kapitel 7.2.1 begründet.
- Die untersuchten Variablen stehen in linearer Abhängigkeit zueinander, das wurde mittels Streudiagrammen überprüft.
- Dass es keine Ausreißer im Datensatz gibt, wurde mit Hilfe der nicht standardisierten Residuen überprüft. Ausreißer wurden aus dem Datensatz ausgeschlossen.
- Die Unabhängigkeit der Residuen sichert ab, dass keine Autokorrelation vorliegt. Die Durbin-Watson-Statistik hat hier einen Wert von 1.8, liegt also nahe bei 2. Dies spricht laut [198, S. 149] dafür, dass keine Autokorrelation vorliegt.

- Multikollinearität liegt vor, wenn zwei oder mehr mögliche Prädiktoren (stark) miteinander korrelieren [50, S. 634]. Dies liegt hier nicht vor: Interesse an Quantenphysik und Physiknote korrelieren gerade einmal mit $r = 0.07$ ($p = 0.245$). Auch die anderen Korrelationen zwischen Prädiktoren liegen unter der Schwelle von 0.7 und sind nicht statistisch signifikant.
- Homoskedastizität, also die zufällige Verteilung der Residuen ist eine wichtige Voraussetzung. Liegt sie nicht vor, spricht man von Heteroskedastizität. In diesem Fall liefert die OLS-Schätzung (Methode der kleinsten Quadrate) keinen effizienten Schätzer, das heißt „die Schätzungen der Standardfehler sind zu groß oder zu klein“ [198, S. 137], statistisch also unbrauchbar. Im Fall dieser Studie wurde Homoskedastizität graphisch überprüft, indem die standardisierten Residuen gegen die vorhergesagten Werte der abhängigen Variable in einem Streudiagramm aufgetragen wurden. Nachdem keine offensichtliche Struktur der Residuen erkennbar ist, kann von Homoskedastizität ausgegangen werden [198, S. 137ff]:

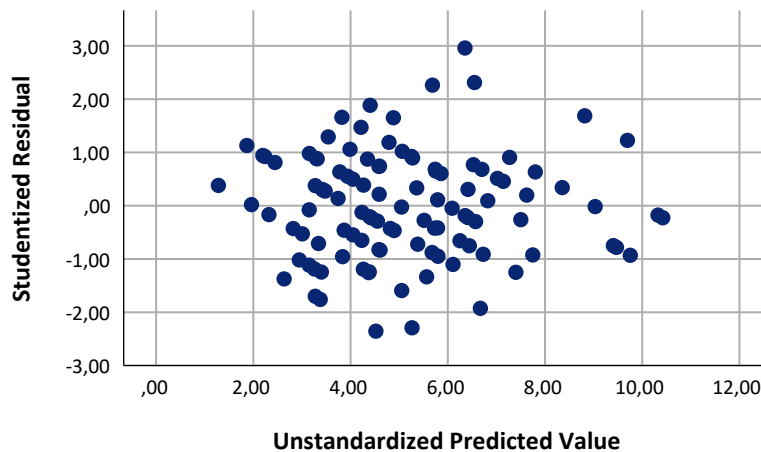


Abbildung 9.5: Streudiagramm zur Überprüfung von Homoskedastizität.

- Die letzte zu prüfende Voraussetzung ist die Normalverteilung der Residuen [198, S. 153f]. Im P-P-Diagramm der standardisierten Residuen liegen die Punkte ziemlich passend auf einer Diagonale, sodass von normalverteilten Residuen ausgegangen werden kann. Der P-P-Plot kann einen Verteilungstest, wie den Kolmogorov-Smirnoff-Test zwar nicht ersetzen, allerdings sind solche Tests sehr konservativ. An dieser Stelle soll daher die visuelle Überprüfung genügen:

9.5. PRÄDIKTOREN FÜR DAS POSTTESTERGEBNIS

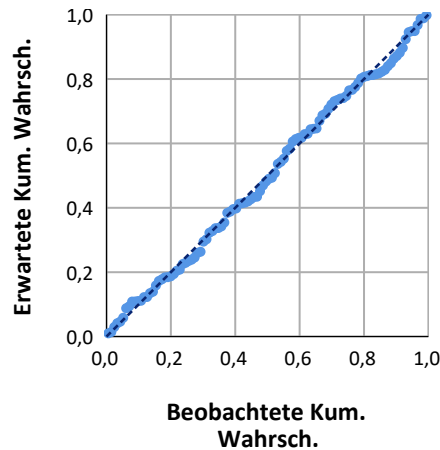


Abbildung 9.6: P-P-Diagramm der standardisierten Residuen.

Die multiple Regressionsanalyse (Methode: Einschluss) zeigt, dass diese unabhängigen Variablen einen signifikanten Einfluss auf das deklarative Wissen zur Quantenoptik zum Postzeitpunkt haben ($F(4, 148) = 32.54, p < 0.001, \omega^2 = 0.46$). Mit Hilfe der Kontrollvariablen lassen sich 47% der Varianz im Posttestergebnis erklären, wobei die Physiknote ($\beta_{\text{Note}} = -0.24, p < 0.001$), das Interesse an Quantenphysik ($\beta_{\text{Interesse}} = -0.19, p < 0.01$) und das Vorwissen ($\beta_{\text{Vorwissen}} = 0.39, p < 0.001$) hoch oder höchst signifikante Prädiktoren sind. Das Geschlecht ist ebenfalls ein signifikanter Prädiktor für das deklarative Wissen in Quantenoptik nach der Intervention ($\beta_{\text{Geschlecht}} = -0.17, p < 0.05$)².

| | Unstand. Koeffizienten | | Stand. Koeffizienten | | |
|-----------------|------------------------|-----------|----------------------|----------|-------|
| | <i>B</i> | <i>SE</i> | β | <i>t</i> | Sign. |
| Prätestergebnis | 0.61 | 0.11 | 0.39 | 5.30 | *** |
| Physiknote | -0.64 | 0.18 | -0.24 | -3.59 | *** |
| Interesse an QP | -0.36 | 0.13 | -0.19 | -2.70 | ** |
| Geschlecht | -0.87 | 0.36 | -0.17 | -2.42 | * |
| Konstante | 7.29 | 0.69 | | 10.62 | *** |

Tabelle 9.5: Multiple Regressionsanalyse für das deklarative Wissen zur Quantenoptik erhoben mittels des Posttests nach der Intervention ($R^2 = 0.47$).

²Rechnet man eine multiple lineare Regression für das Posttestergebnis mit der Kodiervariante 2, d.h. schließt man nur solche richtigen Schülerantworten aus, bei denen geraten wurde, so ist das Geschlecht kein signifikanter Prädiktor mehr. Dies ist in Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus Kapitel 9.3.



Was kann man aus dieser Tabelle lesen? Entscheidend ist die Spalte mit den standardisierten Koeffizienten β , sowie die Spalte zur Signifikanz (Sign.). Die Spalte zur Signifikanz gibt an, ob die jeweilige Variable ein signifikanter Prädiktor ist für die abhängige Variable und die B 's gehen ein in den Schätzer für die abhängige Variable, den man mit den hier vorliegenden Ergebnissen wie folgt schreiben kann:

$$\underbrace{\hat{y}}_{\text{Schätzer für Posttesterg.}} = \underbrace{0.61}_{B_{\text{Prätesterg.}}} \cdot \text{Prätestergebnis} + \underbrace{-0.64}_{B_{\text{Note}}} \cdot \text{Physiknote} + \underbrace{-0.36}_{B_{\text{Interesse}}} \cdot \text{Interesse an QP} + \underbrace{-0.87}_{B_{\text{Geschlecht}}} \cdot \text{Geschlecht} + \underbrace{7.29}_{\text{Konst. } \varepsilon}$$

Man kann diese Gleichung wie folgt lesen:

- Jeder zusätzliche Punkt eines Schülers oder einer Schülerin im Prätest, lässt 0.61 Punkte mehr im Posttest erwarten.
- Jede Notenstufe schlechter (als Zahl also um eins höher), lässt 0.64 Punkte im Posttest weniger erwarten.
- Für jede Stufe, die sich ein Schüler oder eine Schülerin als weniger interessiert an Quantenphysik bewertet (als Zahl also um eins höher), sinkt der Testscore im Posttest um 0.36 Punkte.

Betrachten wir das **Beispiel** eines konkreten Schülers der Stichprobe zur Verdeutlichung: der Proband mit dem Code JM14 ist männlich und erreichte im Prätest 6 Punkte. Er gab an, dass seine letzten beiden Zeugnisnoten in Physik jeweils eine 1 waren. Sein Interesse an Quantenphysik gibt er als „sehr groß“ an (= Rating-Stufe 1). Das obige Regressionsmodell schätzt das Posttestergebnis von JM14 zu

$$\hat{y} = 0.61 \cdot 6 - 0.64 \cdot 1 - 0.36 \cdot 1 - 0.87 \cdot 0 + 7.29 = 9.95.$$

Der Datenmatrix kann entnommen werden, dass JM14 den Posttest in der Tat mit 10 Punkten abschloss.

Man kann nun fragen, inwiefern die Wirksamkeit des Erlanger Unterrichtskonzepts nun tatsächlich unterschiedlich ist für Jungen und Mädchen. Aus den Ergebnissen von Kapitel 8 sieht man, dass - in Deckung mit der bisherigen fachdidaktischen Forschung - das Interesse der Jungen am Fach Physik signifikant höher ist als das der Mädchen ($t(163) = 3.18$, $p < 0.01$, $d = 0.50$). Mittels einer ANCOVA mit Messwiederholung (vgl. Kapitel 7.2.1.5) ließe sich dieser Unterschied im Fachinteresse herauspartialisieren und der Einfluss des Interesses genauer aufklären, aber die statistische Voraussetzung der Homogenität der Kovariate ist hier nicht erfüllt. Man sieht aber durch Vergleich ausge-

wählter Gruppen folgendes: selektiert man die Mädchen und Jungen mit hohem Interesse an Quantenphysik, so erreichen die sehr interessierten Mädchen im Follow-Up-Test im Mittel sogar mehr Punkte (7.20 ± 3.21), als die sehr interessierten Jungen (6.59 ± 2.46). Auch diese Beobachtung stützt den Befund aus Kapitel 9.3.

9.6 Analyse der Antwortsicherheit

Die Schülerinnen und Schüler beurteilten für jedes Item auf einer fünfstufigen Skala (1 = sehr sicher, ..., 5 = geraten), wie sicher sie sich bei der Antwortfindung waren. Diese subjektiv empfundene Sicherheit im Umgang mit den Begriffen der Quantenoptik steigt erwartungsgemäß von Prä- zu Postzeitpunkt an. Ein Friedman-Test zeigt einen signifikanten Unterschied zwischen den drei Erhebungszeitpunkten an ($\chi^2(95,2) = 145.97, p < 0.001$) und ein Post-Hoc-Test mit Bonferroni-Korrektur erklärt:

- Der Anstieg der Antwortsicherheit von Prä- zu Post- ($p < 0.001, r = 0.17$) und zu Follow-Up-Test ($p < 0.001, r = 0.12$) ist statistisch höchst signifikant.
- Der Rückgang der Antwortsicherheit von Post- zu Follow-Up-Test wird ebenfalls statistisch signifikant ($p < 0.001$) aber die Effektstärke ist nur sehr klein ($r = 0.04$).

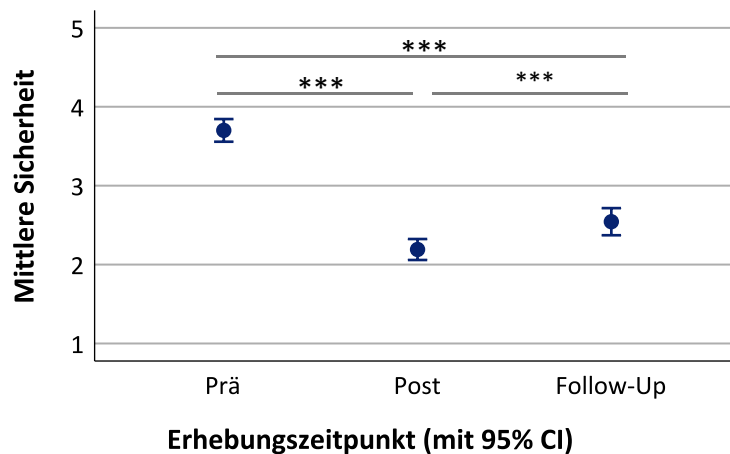


Abbildung 9.7: Entwicklung der Antwortsicherheit über die drei Erhebungszeitpunkte. Im Prätest lag die mittlere Sicherheit bei 3.68 ± 0.73 , im Posttest bei 2.13 ± 0.63 und im Follow-Up-Test bei 2.57 ± 0.83 . Abbildung bereits publiziert in [15].

Untersucht man die Antwortsicherheit auf Itemebene, so zeigt sich, dass alle Items im Posttest signifikant sicherer beantwortet werden. Die Schülerinnen und Schüler scheinen sich also im Umgang mit den Begriffen nach der Intervention sicher(er) zu fühlen. Dies wird unter anderem dadurch untermauert, dass die mittlere Sicherheit im Posttest für alle 13 Items den Wert von 2.64 nicht überschreitet:

| | Prätest | Posttest | <i>t</i> |
|---------|-------------|-------------|----------|
| Item 1 | 4.16 ± 1.05 | 1.86 ± 0.80 | 31.33 |
| Item 2 | 3.89 ± 1.08 | 1.96 ± 0.88 | 25.76 |
| Item 3 | 2.81 ± 1.27 | 2.00 ± 1.07 | 11.28 |
| Item 4 | 2.92 ± 1.33 | 2.46 ± 1.24 | 7.39 |
| Item 5 | 3.49 ± 1.30 | 2.14 ± 1.13 | 16.01 |
| Item 6 | 3.88 ± 1.17 | 2.15 ± 1.02 | 21.82 |
| Item 7 | 2.77 ± 1.31 | 1.85 ± 0.94 | 14.28 |
| Item 8 | 3.10 ± 1.48 | 2.65 ± 1.20 | 8.49 |
| Item 9 | 3.86 ± 1.19 | 2.26 ± 0.98 | 18.07 |
| Item 10 | 4.13 ± 1.13 | 1.95 ± 1.11 | 26.15 |
| Item 11 | 4.47 ± 0.93 | 2.02 ± 1.12 | 27.33 |
| Item 12 | 4.24 ± 0.97 | 2.09 ± 0.95 | 31.00 |
| Item 13 | 2.82 ± 1.35 | 1.65 ± 0.83 | 16.01 |

Tabelle 9.6: Antwortsicherheit je Item im Prä-Posttestvergleich. Alle Änderungen sind nach einem t-Test für verbundene Stichproben statistisch höchst signifikant ($p < 0.001$).



Im nächsten Abschnitt wird eine knappe Analyse des Lernzuwachses nach Inhaltsbereichen berichtet. An dieser Stelle soll dann auch noch einmal kurz auf die Antwortsicherheit Bezug genommen werden.

9.7 Inhaltsspezifische Analyse des Lernzuwachses

In Kapitel 6 dieser Arbeit wurden die Ergebnisse einer konfirmatorischen Faktorenanalyse berichtet. Mit dieser konnte eine dreifaktorielle Struktur des Testinstruments zum deklarativen Wissen in Quantenoptik bestätigt werden. Der Test besteht also aus den drei empirisch trennbaren Subskalen, die benannt werden können via (vgl. Kapitel 4):

1. Theoretische Aspekte: 5 Items
2. Einzelphotonenexperimente: 5 Items
3. Photonen: 3 Items

Es zeigte sich, dass die Skalenreliabilitäten niedrig sind, sodass Mittelwertbildung für die einzelnen Skalen keinen Sinn ergibt. Trotzdem soll eingeschätzt werden können, auf welche Inhaltsbereiche der statistisch bestätigte Lernzuwachs besonders zurückzuführen ist. Die nachfolgende Tabelle zeigt dazu für jede Skala den Anteil richtig gelöster Items für alle drei Erhebungszeitpunkte:

9.7. INHALTSSPEZIFISCHE ANALYSE DES LERNZUWACHSES

| | Prä | Post | Follow-Up |
|---------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Theoretische Aspekte | 0.23 ± 0.22 | 0.36 ± 0.27 | 0.31 ± 0.30 |
| Einzelphotonenexperimente | 0.03 ± 0.08 | 0.33 ± 0.20 | 0.26 ± 0.23 |
| Photonen | 0.16 ± 0.25 | 0.63 ± 0.31 | 0.53 ± 0.33 |

Tabelle 9.7: Mittlerer Anteil gelöster richtiger Items je Subskala zu den drei Erhebungszeitpunkten.

Bezogen auf die Subskala **Theoretische Aspekte** sieht man, dass der absolute Anstieg des Anteils richtig gelöster Items von Prä- zu Posttest verglichen mit den anderen Skalen am kleinsten ausfällt, dass aber auch der Rückgang zum Follow-Up-Test nur fünf Prozentpunkte beträgt. Dies ist in Deckung mit der Erwartung, weil allgemeine Themen, wie zum Beispiel die atomare Energieanregung oder Interferenz von Wellen im Unterricht zur Quantenoptik zwar benötigt, aber nicht explizit erläutert oder behandelt werden. Dieser Eindruck verstärkt sich, wenn man die Änderung in der Antwortsicherheit bezogen auf die Items dieser Skala betrachtet. Während die mittlere Antwortsicherheit im Prätest 3.29 beträgt, steigt diese im Posttest auf 2.19. Die Änderung liegt betragsmäßig bei 1.10 und ist damit, verglichen mit den anderen Subskalen des Tests, am niedrigsten (vgl. Tab. 9.8).

| | Prä | Post | Δ |
|---------------------------|------|------|----------|
| Theoretische Aspekte | 3.29 | 2.19 | -1.10 |
| Einzelphotonenexperimente | 4.07 | 2.09 | -1.98 |
| Photonen | 3.25 | 1.86 | -1.39 |

Tabelle 9.8: Die Änderung Δ der mittleren Ankreuzsicherheit für die Items der drei Subskalen des Tests. Für die drei Skalen zeigt sich ein deutlicher Anstieg in der Antwortsicherheit. Dass der Anstieg für die Skala „Theoretische Aspekte“ am kleinsten ausfällt, ist in Deckung mit der Erwartung.

Ein Anstieg um 30 Prozentpunkte in dem mittleren Anteil richtig gelöster Items zeigt sich für die Skala **Einzelphotonenexperimente**: während zu Beginn erwartungsgemäß kein Vorwissen zu diesem Bereich vorlag ($m = 0.03$, $SD = 0.08$), lösten die Schülerinnen und Schüler im Nachtest im Mittel immerhin ein Drittel der Items richtig und waren sich dabei sicher. Dieser Prozentsatz erhöht sich auf knapp 47% im Mittel richtig gelöster Items im Posttest, wenn man nur die geratenen richtigen Lösungen herausfiltert. Dass der Anteil richtig gelöster Antworten auch im zeitverzögerten Nachtest noch fast bei 30% liegt, kann als Indiz für nachhaltigen Lernzuwachs in diesem Bereich gewertet werden.

Die Subskala zu **Photonen** ist von besonderer Bedeutung. Die drei Items adressieren in unterschiedlichen Kontexten primär eine naive Teilchenvorstellung von Photonen. Der nur kleine mittlere Prozentsatz richtig gelöster Items im Prätest lässt erahnen -

ohne anhand der Multiple-Choice-Fragen konkrete Aussagen über Schülervorstellungen machen zu können - dass eine naive Teilchenvorstellung in der untersuchten Stichprobe weit verbreitet zu sein scheint. Dass der Anteil richtig gelöster Items im Posttest auf über 60% ansteigt, kann man zunächst als Argument dafür auffassen, dass man dieser Fehlvorstellung mit Hilfe des Erlanger Konzepts entgegenwirken konnte. Aber: betrachtet man den Rückgang zum Follow-Up-Test, so liegt dieser mit zehn Prozentpunkten so hoch, wie für keine andere Subskala des Tests. Wie genau sehen nun die Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler zum Photon aus? Diese Frage bleibt zunächst offen. Wir sehen lediglich einen Rückgang im Anteil richtig gelöster Items, bei denen sich die Schüler sicher waren und jeder Versuch einer Erklärung wäre ohne weitere Daten unbegründet.

Mit dieser Beobachtung soll an die nächsten beiden Kapitel angeknüpft werden: Welche Vorstellungen Schüler haben, geht über eine Bewertung des deklarativen Wissens hinaus. Die Lernenden kennen im Post- und im zeitverzögerten Nachtest die Begriffe überwiegend, das zeigen die Ergebnisse dieses Kapitels. Aber sie zeigen auch deutlich, was noch nicht anhand der Daten gesagt werden kann, z.B.:

- Welche Vorstellungen entwickeln die Lernenden, die mittels des Erlanger Unterrichtskonzepts in die Quantenphysik eingeführt werden konkret?
- Können die Schülerinnen und Schüler im neuen Begriffsnetz konsistent argumentieren, haben Sie die Zusammenhänge also verstanden?

Fragen dieser Art vermag man mit dem Testinstrument zur Quantenoptik nicht zu klären. In den folgenden Kapiteln stellen wir daher Ergebnisse aus einer Befragung mit einem Vorstellungfragebogen und die Ergebnisse einer Interviewstudie vor.

9.8 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die Ergebnisse zum deklarativen Wissen in Quantenoptik vorgestellt, welches mittels eines Testinstruments aus dreizehn geschlossenen Items Variante Single-Choice erhoben wurde. Dieses Kapitel ist für die Einschätzung der weiteren Ergebnisse wichtig, denn es zeigt: Schülerinnen und Schüler entwickeln durch das Erlangen Konzept ein grundsätzliches Begriffswissen zur Quantenoptik. Dies legitimiert in der Folge die Beforschung von Schülervorstellungen zu Aspekten der modernen Quantenphysik. Die wichtigsten Ergebnisse dieses Kapitels waren die Folgenden:

- Es zeigt sich ein statistisch signifikanter Lernzuwachs von Prä- zu Posterhebung ($r = 0.11$). Insbesondere werden die Lernenden dabei auch sicherer und zwar in jedem Item des Tests.
- Der Rückgang in der mittleren Punktzahl von Post- zu Follow-Up-Test wird nicht statistisch signifikant ($p = 0.261$). Dies kann als Indiz für einen nachhaltigen Lernzuwachs gewertet werden.
- Geschlechterspezifische Unterschiede zeigen sich signifikant nur bezogen auf das Vorwissen. Im Posttest holen die Mädchen auf: das sieht man, wenn die Klausel in der Kodierung der Items fallen gelassen wird, dass ein Punkt nur vergeben wird, wenn die Probanden dabei auch mindestens sicher waren. Dies berücksichtigt das niedrigere physikbezogene Selbstkonzept der weiblichen Studienteilnehmerinnen.
- Das fachspezifische Prätestergebnis, die Physiknote, das Interesse an Quantenphysik und das Geschlecht sind signifikante Prädiktoren für das Posttestergebnis, also für das durch die Intervention entwickelte deklarative Wissen in Quantenoptik. Es scheint plausibel, dass das Geschlecht eigentlich nicht kausal ursächlich ist für die unterschiedliche Performanz der Lernenden, sondern das höhere Fachinteresse der Jungen zu besseren Testergebnissen führt. Eine statistische Aufklärung ist im Rahmen dieser Arbeit aber nicht möglich, weil die statistischen Voraussetzungen für eine ANCOVA nicht erfüllt sind.
- Während für die Subskala *Theoretische Aspekte* der Lernzuwachs nur moderat ist, steigt der mittlere Anteil richtig gelöster Items für die Subskalen *Einzelphotonenexperimente* und *Photonen* im Prä-Posttestvergleich stark an. Dem kann man entnehmen, dass der gefundene Lernzuwachs primär auf quantenoptikspezifische Testitems zurückzuführen ist. Der Rückgang richtig gelöster Items ist für die Subskala *Photonen* zum Follow-Up-Test deutlich.

KAPITEL 10

Ergebnisse zur Förderung quantenphysikalischer Vorstellungen

„Fehlt dir's an Weisheit in manchen Dingen, lass dir von Nürnberg den Trichter bringen.“

- Werbevignette von 1910

Einordnung in den Kontext der Arbeit

Im letzten Kapitel wurden Ergebnisse vorgestellt, die nahe legen, dass Schülerinnen und Schüler, die mit Hilfe des Erlanger Unterrichtskonzepts in die Quantenphysik eingeführt werden, nachhaltig deklaratives Wissen zur Quantenoptik aufbauen. In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse aus der Erfassung der Vorstellungen der Lernenden mit Hilfe des Vorstellungsfragebogens vorgestellt werden. Die Einführung des Vorstellungsfragebogens und die zugehörige Auswertemethodik kann in Kapitel 4 dieser Arbeit nachgelesen werden.

Es wird in diesem Kapitel der Erfolg des Erlanger Unterrichtskonzepts bezogen auf die Adäquatheit der entwickelten Vorstellungen der Lernenden zur Quantenphysik gemessen. Dazu kann - wie in Kapitel 4 dieser Arbeit beschrieben - anhand der beantworteten Fragebögen auf einen Index zur Einschätzung der Vorstellungen der Lernenden geschlossen werden, wie dies von [143] vorgeschlagen wurde. Dieser Index wurde separat für die beiden Einzelaspekte *Wahrscheinlichkeitsdeutung* und *Eigenschaftsbegriff*, sowie als Gesamtindex über beide Teilbereiche hinweg berechnet. An der Befragung mit dem Vorstellungsfragebogen nahmen $N = 118$ Schülerinnen und Schüler teil, nachdem diese mittels des Erlanger Unterrichtskonzepts in die Quantenphysik eingeführt wurden (vgl. Kap. 7.1).



Natürlich kann die Vorstellung von Schülerinnen und Schülern nicht auf eine Zahl reduziert werden. Diese Zahl über die Stichprobe hinweg analysiert, kann aber zur Beurteilung des Erfolgs des Unterrichtskonzepts herangezogen werden [143]. Der Frage danach, *welche* Vorstellungen Schülerinnen und Schüler zu den einzelnen Aspekten der Quantenphysik entwickeln, wollen wir im nächsten Kapitel nachgehen, wenn die Ergebnisse der Interviewstudie dargestellt werden. Teile dieses Kapitels sind bereits veröffentlicht bei [15].

10.1 Vorstellungen zur Wahrscheinlichkeitsdeutung

In Kapitel 4.4 dieser Arbeit wurde dargestellt, mit Hilfe welcher Fragen im Vorstellungsbogen der jeweilige Aspekt adressiert wird. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Verteilung der Indexwerte zur Wahrscheinlichkeitsdeutung.

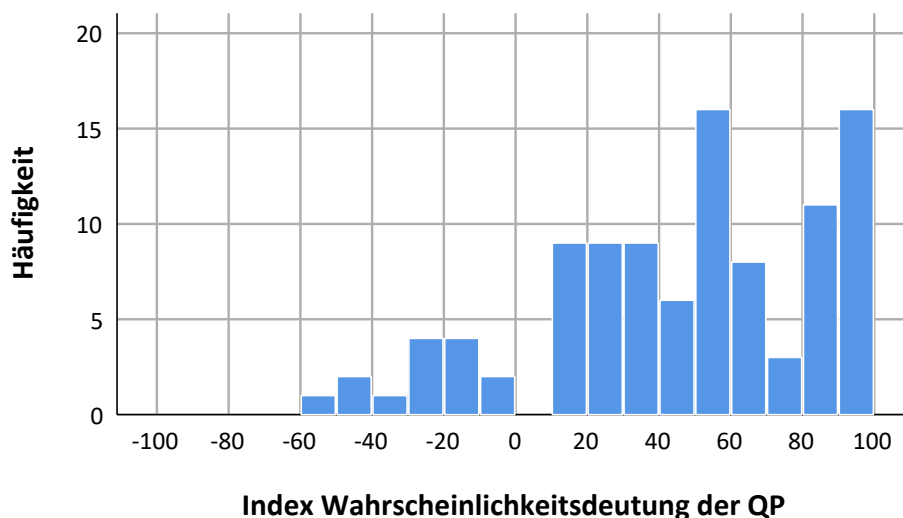


Abbildung 10.1: Verteilung der Werte des Index zur Wahrscheinlichkeitsdeutung zum Posttestzeitpunkt. Abbildung bereits publiziert in [15].

Es zeigt sich, dass ein großer Teil der Befragten einen Indexwert größer als 0 erreicht, was für das Vorliegen quantenphysikalisch adäquater Vorstellungen spricht ($m = 45.79$, $SD = 40.22$). Betrachtet man das Antwortverhalten für einzelne Fragen genauer, so zeigt sich, dass es überwiegend zu einer Ablehnung deterministischer Vorstellungen kommt. Dabei scheint dem Großteil der Befragten der Unterschied zur klassischen Physik bewusst zu sein, wenn man die beiden Aussagen

W_9: „Bei ausreichend genauer Kenntnis der Anfangsbedingungen könnte man vorhersagen, ob ein einzelnes Photon am Strahlteiler transmittiert oder reflektiert wird.“

und

W_10: „Bei ausreichend genauer Kenntnis der Anfangsbedingungen könnte man in der klassischen Physik das Ergebnis eines Würfelwurfs vorhersagen.“

des Vorstellungsfragebogens hinsichtlich des Antwortverhaltens der Schülerinnen und Schüler vergleicht:

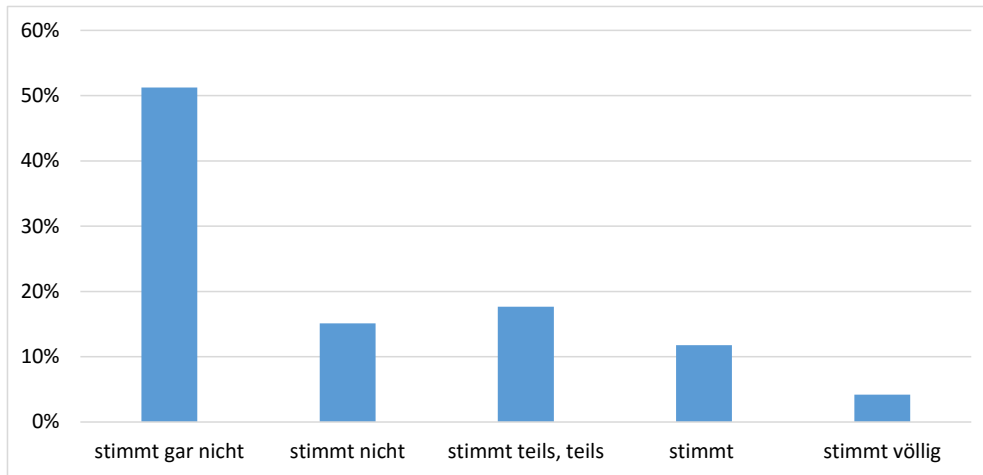


Abbildung 10.2: Histogramm zur Verteilung der Antworten auf die Frage W_9.

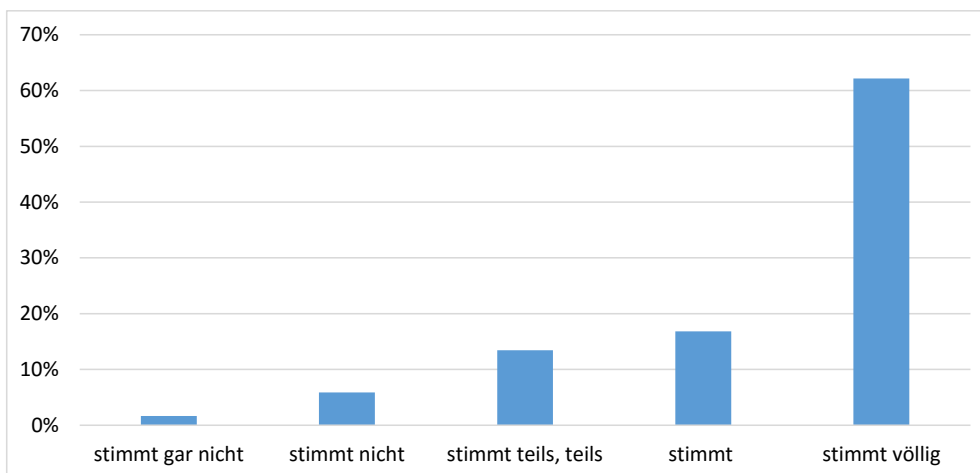


Abbildung 10.3: Histogramm zur Verteilung der Antworten auf die Frage W_10 (rechts).

Außerdem scheint ein Großteil der Schülerinnen und Schüler eine Vorstellung über den statistischen Charakter insofern gewonnen zu haben, als dass ihnen bewusst zu sein scheint, dass sie keine Aussagen für ein einzelnes Quantenobjekt, wohl aber für ein Ensemble von Quantenobjekten treffen können. Dies sieht man, wenn man das Antwortverhalten zur Aussage

W_4: „Über das Verhalten einzelner Photonen im Interferometer kann ich keine Aussagen machen. Ich kann nur Aussagen über das statistische Verhalten vieler gleichartiger präparierter Photonen machen.“

analysiert. Obwohl die Streuung recht groß ist, ist ein Peak bei „stimmt“ (entspricht auf der Ratingskala Stufe 4) klar erkennbar ($m = 3.69$, $SD = 1.07$):

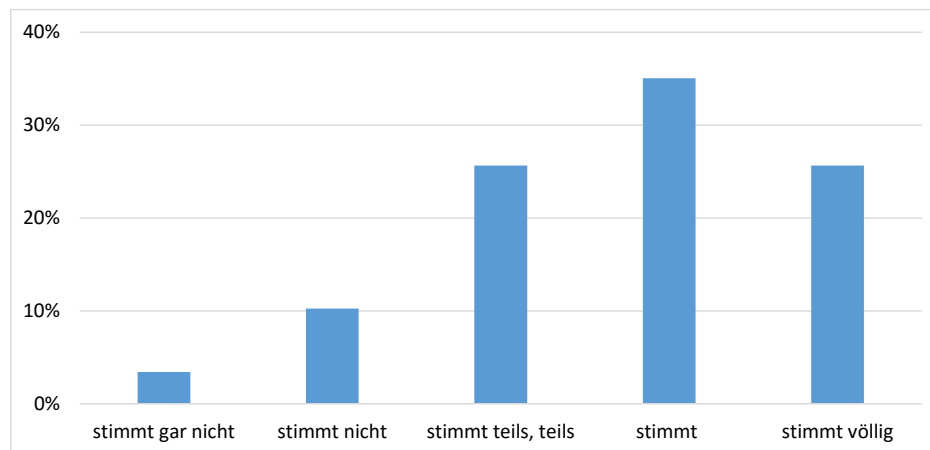


Abbildung 10.4: Histogramm zur Verteilung der Antworten auf die Frage W_4 .

10.2 Vorstellungen zum Eigenschaftsbegriff

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Verteilung der Indexwerte zum Eigenschaftsbegriff.

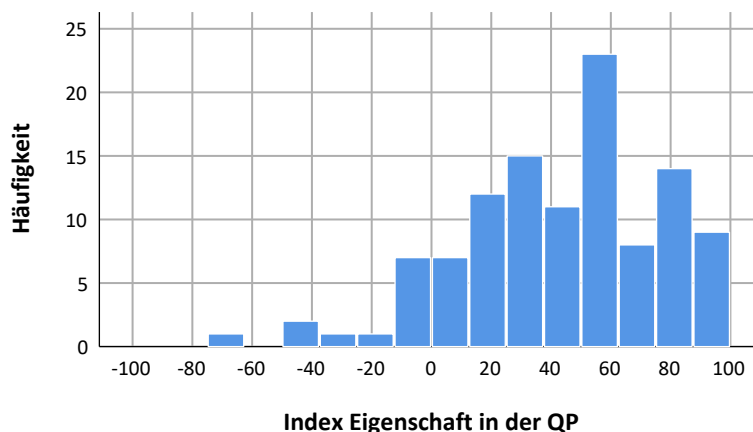


Abbildung 10.5: Verteilung der Werte des Index zum Eigenschaftsbegriff zum Posttestzeitpunkt. Abbildung bereits publiziert in [15].

Es zeigt sich, dass ein großer Teil der Befragten einen Indexwert größer als 0 erreicht, was für das Vorliegen quantenphysikalisch adäquater Vorstellungen spricht ($m = 41.01$, $SD = 35.15$). Die Schülerinnen und Schüler entwickeln ein Empfinden dafür, dass Quantenobjekte Eigenschaften, die klassischen Objekten stets zugeordnet werden können, nicht permanent *besitzen*. Betrachtet man beispielsweise das Antwortverhalten auf Aussage

*Eig_8: „In der Quantenphysik ist es möglich, dass ein Quantenobjekt klassisch wohldefinierte Eigenschaften, wie den Ort, **nicht** besitzt“*,

so fällt auf, dass 56% der Schülerinnen und Schüler dieser völlig zustimmen, aber nur deutlich unter 8% der Schülerinnen und Schüler angeben, sie stimme (gar) nicht.

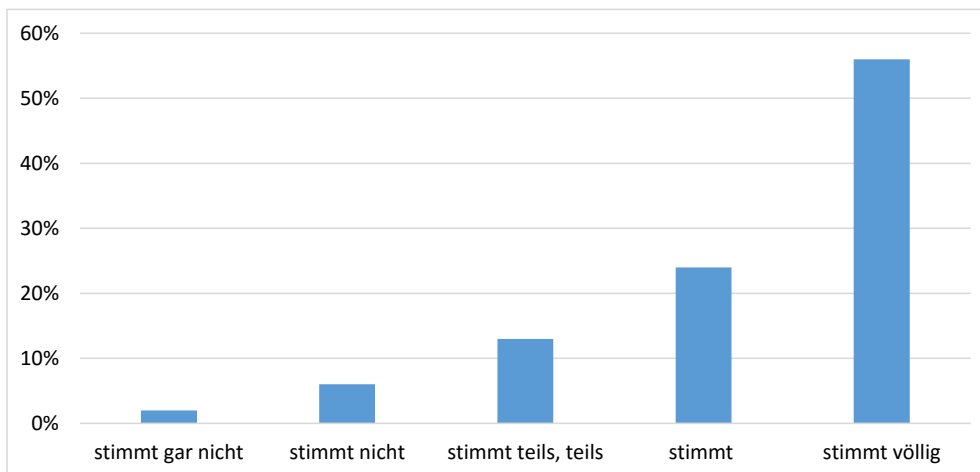


Abbildung 10.6: Histogramm zur Verteilung der Antworten auf die Frage Eig_8.

Ein etwas differenziertes Bild zeigt sich, wenn man ganz konkret Bezug auf die Eigenschaft Ort für ein Quantenobjekt nimmt. Zwar stimmen 77% der Schülerinnen und Schüler der Aussage

Eig_5: „Die augenblickliche Position eines Photons zwischen Quelle und Detektor ist prinzipiell unbestimmt“,

zu, während diese von nur 9% abgelehnt wird. Allerdings findet man: viele der Schülerinnen und Schüler scheinen eine indifferente Vorstellung zum Eigenschaftsbegriff zu haben. Die Aussage

Eig_6: „Die augenblickliche Position eines Photons zwischen Quelle und Detektor ist nicht prinzipiell unbestimmt, sondern dem Experimentator unbekannt“

wird nämlich von 31% der Schülerinnen und Schüler mit „stimmt teils, teils“ bewertet und 14% stimmen ihr (völlig) zu.

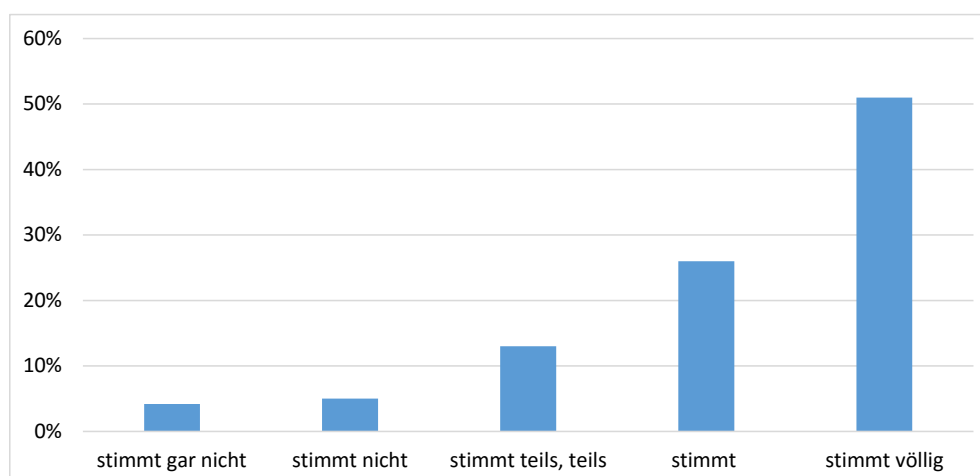


Abbildung 10.7: Histogramm zur Verteilung der Antworten auf die Frage Eig_5.

10.2. VORSTELLUNGEN ZUM EIGENSCHAFTSBEGRIFF

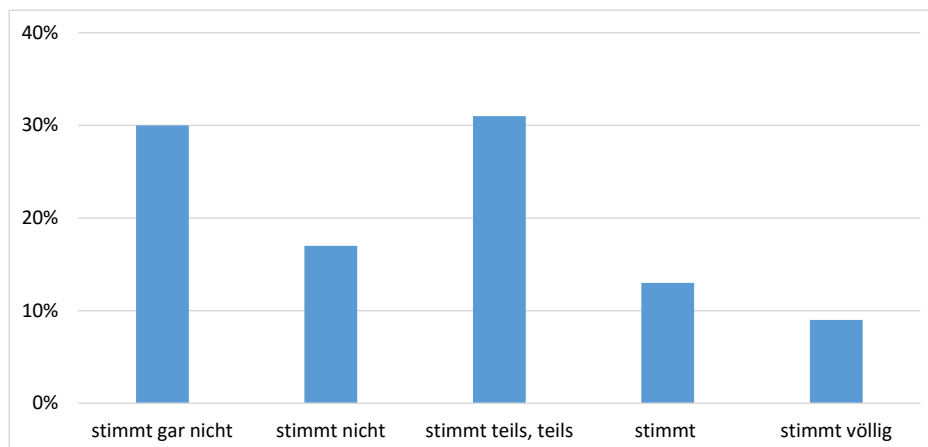


Abbildung 10.8: Histogramm zur Verteilung der Antworten auf die Frage Eig_6.



Wir wollen hier einen kurzen Ausblick auf die Ergebnisse der Interviewstudie geben: Lernende, die mit dem Erlanger Konzept in die Quantenphysik eingeführt werden, zeigen unterschiedliche Vorstellungen zum Eigenschaftsbegriff, die sich sehr klar in verschiedene Cluster zusammenfassen lassen. 8 der 25 interviewten Schülerinnen und Schüler (entspricht 32%) lassen sich aufgrund der geäußerten Vorstellungen dem Cluster *Indifferenten Eigenschaftsbegriff* zuordnen. Dies deckt sich ziemlich gut mit dem hier vorgestellten Anteil von Schülerinnen und Schülern, die Aussage Eig_6 zum Teil zustimmen (31%).

Dieser Befund passt zusammen mit dem Antwortverhalten auf die Aussage

Eig_2: „Wenn das Photon im Interferometer zum Detektor fliegt, nimmt es einen ganz bestimmten Weg, auch wenn ich ihn nicht bestimmen kann“,

die sehr deutlich auf mechanistische Denkweisen rekurriert. Sie wird von knapp einem Drittel der Lernenden als teilweise richtig bewertet wird (26%) und sogar von 41% als richtig oder als völlig richtig.

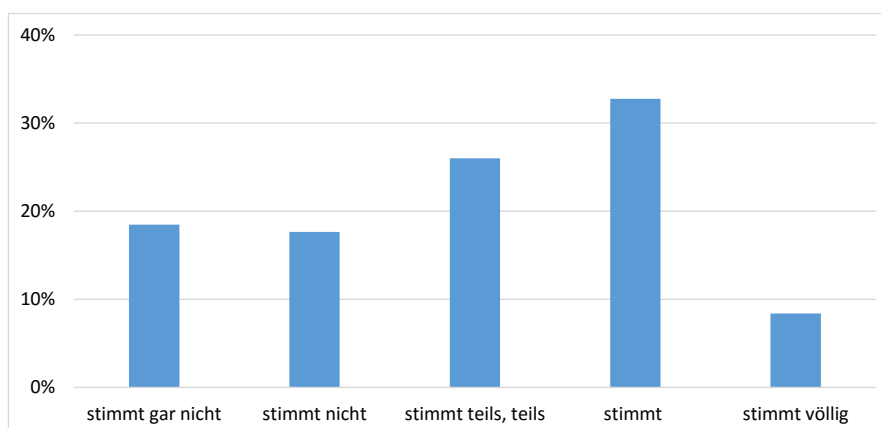


Abbildung 10.9: Histogramm zur Verteilung der Antworten auf die Frage Eig_2.

10.3 Gesamtindex in der Übersicht

Die in den beiden vorherigen Abschnitten diskutierten Indizes für die Teilbereiche *Eigenschaftsbegriff* und *Wahrscheinlichkeitsdeutung* lassen sich auch gegeneinander im Streudiagramm darstellen. Es zeigt sich ein höchst signifikanter korrelativer Zusammenhang ($r = 0.47, p < 0.001$).

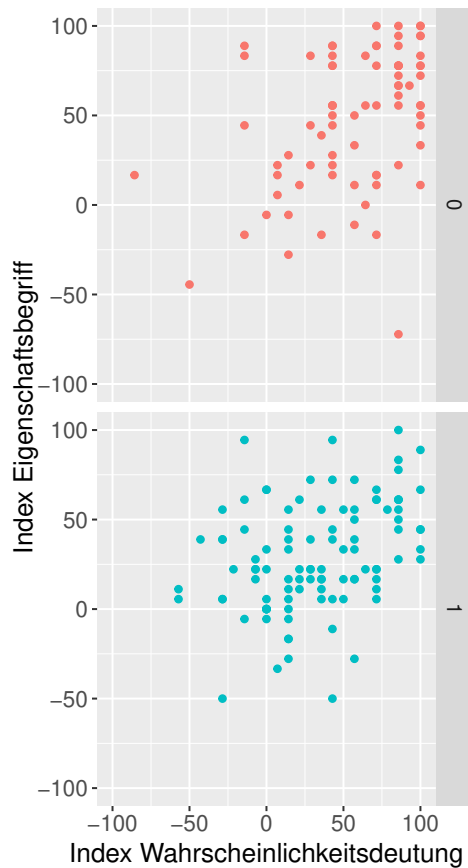


Abbildung 10.10: Streudiagramm zu den Indizes „Eigenschaftsbegriff“ und „Wahrscheinlichkeitsdeutung“ gruppiert nach Geschlecht (0 = Jungen, 1 = Mädchen)

Ein geschlechterspezifischer Unterschied ist graphisch zwar nicht unmittelbar erkennbar, zeigt sich aber statistisch.

10.3. GESAMTINDEX IN DER ÜBERSICHT

| | Eigenschafts- begriff | Wahrscheinlichkeits- deutung | Gesamtindex |
|----------|--------------------------|---------------------------------|-------------------|
| männlich | 60.35 ± 36.28 | 51.44 ± 39.23 | 55.04 ± 32.21 |
| weiblich | 35.29 ± 39.89 | 33.33 ± 29.85 | 34.56 ± 28.93 |
| <i>t</i> | 3.48 | 2.85 | 3.59 |
| Sign. | *** | ** | *** |
| <i>d</i> | 0.66 | 0.51 | 0.66 |

Tabelle 10.1: t-Tests für unabhängige Stichproben zeigen einen signifikanten Unterschied mit hohen Effektstärken zwischen den Vorstellungsindizes der Mädchen und denen der Jungen an und zwar zugunsten der Jungen.

Positiv ist aber: die überwiegende Mehrheit der Schülerinnen und Schüler erreicht einen positiven Wert des Gesamtindex. Ein solcher Indexwert über Null spricht dafür, dass die quantenphysikalischen Vorstellungen gegenüber den Klassischen überwiegen [143, S. 152]: Der hohe Mittelwert von 34.56 ± 28.93 für Mädchen und erst recht der von 55.04 ± 32.21 für die Jungen weisen darauf hin, dass die Schülerinnen und Schüler adäquate quantenphysikalische Vorstellungen aufgebaut haben.

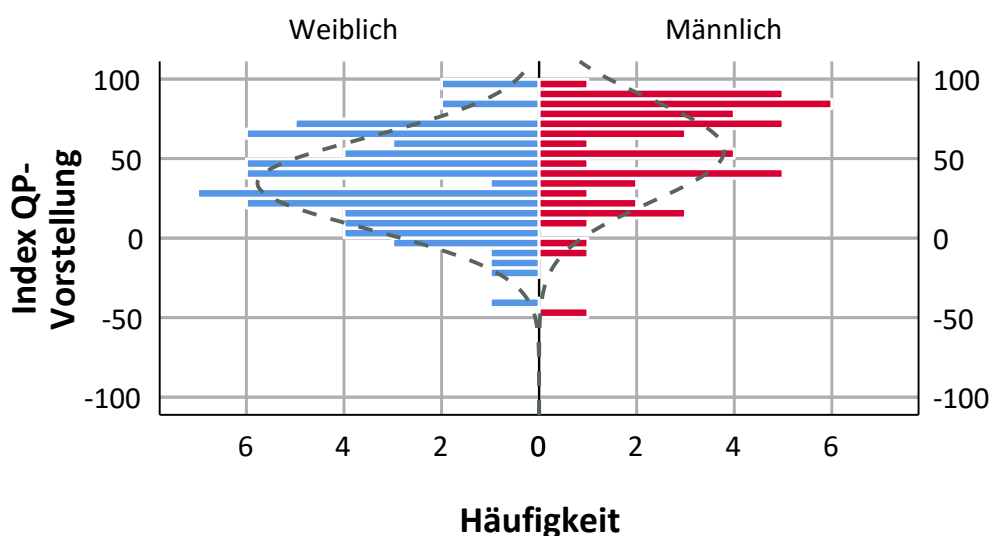


Abbildung 10.11: Verteilung der Vorstellungs-Gesamtindizes getrennt für Jungen und Mädchen. Abbildung bereits publiziert in [15].

10.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die Ergebnisse zum Vorstellungsbogen Quantenphysik berichtet. Die folgenden Ergebnisse sind zentral:

- Die Schülerinnen und Schüler erlangen überwiegend adäquate Vorstellungen zur Wahrscheinlichkeitsdeutung der Quantenphysik. Der mittlere gemessene Index liegt bei $m = 45.79$, $SD = 40.22$. Über 80% der Befragten stimmen der Aussage mindestens teilweise zu, dass man für das Verhalten einzelner Quantenobjekte keine Prognosen machen kann, wohl aber für Ensembles von Quantenobjekten.
- Das Antwortverhalten zu den Aussagen W_9 und W_10 zeigt, dass einem Großteil der Schülerinnen und Schülern bewusst ist, dass der Determinismus aus der klassischen Physik nicht auf die Quantenphysik übertragen werden kann.
- Der mittlere Index zu den Vorstellungen zum Eigenschaftsbereich liegt mit $m = 41.01$, $SD = 35.15$ ebenfalls im deutlich positiven Bereich, auch hier scheinen quantenphysikalische Vorstellungen die klassischen Denkweisen zu überwiegen. Allerdings zeichnet sich bei genauerer Analyse des Antwortverhaltens bei einzelnen Aussagen ein etwas differenzierteres Bild: eine indifferente Vorstellung zum Aspekt Eigenschaft in der Quantenphysik scheint verbreitet.
- In beiden Teilbereichen, der Wahrscheinlichkeitsdeutung und zum Eigenschaftsbegriff entwickeln Jungen statistisch signifikant quantenphysikalisch adäquatere Vorstellungen als die Mädchen. Bei beiden Gruppen ist aber der Vorstellungsinde in allen Bereichen und auch der Gesamtindex jeweils niemals unterhalb von 33. Bei Mädchen dominieren also genauso wie bei Jungen, die quantenphysikalischen Vorstellungen.

KAPITEL 11

Konzeptverständnis und Vorstellungen Lernender zur Quantenphysik – Auswertung der leitfadengestützten Interviews

„Die Phantasie ist wichtiger als Wissen. Wissen ist begrenzt, Phantasie umspannt die Welt.“

- Albert Einstein, 1929

Einordnung in den Kontext der Arbeit

Mit Hilfe der leitfadengestützten Interviews sollen zum Einen das konzeptuelle Verständnis der Schülerinnen und Schüler für die Wesenszüge *Statistisches Verhalten* und *Fähigkeit zur Interferenz* sowie das Verständnis für grundlegende Konzepte der Quantenoptik evaluiert werden. Zum Anderen stehen die Vorstellungen, die Lernende entwickeln, die mittels des Erlanger Unterrichtskonzepts in die Quantenphysik eingeführt werden, im Zentrum. Wichtige Fragen sind dabei: Welche Vorstellungen entwickeln sich genau? Können bekannte Lernschwierigkeiten umgangen werden? Ergeben sich gewisse Muster von Schülervorstellungen? Ergebnisse der Interviewstudie, die zur Klärung solcher und anderer Fragen beitragen, werden in diesem Kapitel präsentiert. Die zugrundeliegenden Forschungsfragen der Interviewstudie, sowie Details zur Entwicklung des Interviewleitfadens und zur Kodierung der Schülerantworten finden sich in Kapitel 4 dieser Arbeit sowie im Anhang G.

Es wurden 25 Schülerinnen und Schüler nach der Intervention interviewt, 15 davon waren männlich (vgl. Tabelle 7.1). Die Interviews dauerten zwischen 25 und 45 Minuten. Die Ergebnisse der Interviewstudie werden in diesem Kapitel auf die folgende Art und Weise präsentiert: Zunächst wollen wir auf verschiedene Vorstellungen der Ler-

nenden rund um die Wesenszüge *Statistisches Verhalten* und *Fähigkeit zur Interferenz* eingehen, ferner auf die zum Eigenschaftsbegriff in der Quantenphysik und dem Photon als Quantenobjekt. Alle Kategorisierungen der Schülerantworten wurden von zwei unabhängigen Beurteilern vorgenommen und es wird jeweils Cohens Kappa als Übereinstimmungsmaß berichtet. Im Anschluss wird auf das Verständnis der Schülerinnen und Schüler für grundlegende Konzepte der Quantenoptik Bezug genommen. Während mit dem Fachwissenstest primär deklaratives Wissen erhoben werden kann, sollen die Schülerantworten in der Interviewstudie genauere Einblicke geben, inwiefern die Lernenden zu konsistenten Argumentationen innerhalb des neuen Begriffsfelds befähigt wurden. Zum Abschluss des Kapitels folgt eine Diskussion der Ergebnisse.



Zur Einschätzung der in diesem Kapitel berichteten Ergebnisse ist folgender Hinweis wichtig: Jede Kategorie wurde für jeden Schüler maximal einmal kodiert. Wurden mehrere Aussagen gemacht, die für eine Zuordnung in dieselbe Auswertungskategorie geeignet sind, wird dennoch nur einmal kodiert. Für jeden Befragten kann also nur festgestellt werden, ob Aussagen getroffen wurden, die in die entsprechenden Kategorien fallen, oder nicht. Aber: Wurden vom Befragten keine Aussagen getroffen, welche sich der Kategorie X zuordnen lassen, darf daraus nicht gefolgert werden, dass der Befragte die Vorstellung X nicht besitzt - er hat sie lediglich nicht geäußert. Natürlich ist es Anspruch der Interviews die Vorstellungen der Lernenden möglichst umfassend aufzudecken. Aber die clusteranalytisch extrahierten Schülervorstellungstypen, die in diesem Kapitel vorgestellt werden, sind vor dem Hintergrund dieser Ausführungen nicht als feste, strenge Typen aufzufassen, sondern eher als primäre Vorstellungsmuster. Dies gilt natürlich nicht zuletzt, weil die Stichprobengröße von $N = 25$ generalisierende Schlüsse nicht erlaubt.

11.1 Vorstellungen zur Quantenwelt

Die¹ erste Frage des Interviews

Beschreibe doch einmal, was für dich die Quantenwelt ausmacht?

mit den möglichen Nachfragen

Was charakterisiert denn für dich die Quantenwelt?

oder

Wo liegen für dich Unterschiede zur klassischen Welt?

dienen als gesprächsinitiierender Einstieg ins Interview. Sie ermöglicht aber auch Einblicke, welche Assoziationen Lernende mit dem Begriff Quantenphysik bzw. Quantenwelt haben, nachdem sie mit dem Erlanger Unterrichtskonzept in die Quantenphysik eingeführt wurden.

¹Dieses Kapitel ist bereits publiziert in [12].



Es ist hier nicht auszuschließen, dass es zur Interferenz kommt zwischen Vorstellungen, die durch die Intervention mit dem Erlanger Konzept gefördert werden und solchen, die Schülerinnen und Schüler mit in den Unterricht gebracht haben, beispielsweise aus informellen Lernsystemen oder Gespräche mit ihren Eltern. Es geht hier also nicht darum, die Vorstellungen der befragten Lernenden kausal auf die Intervention zurückzuführen und dies ist ein der Schülervorstellungsforschung innewohnendes Problem. Man erhält dennoch ein Bild darüber, welche Vorstellungen bei Lernenden vorliegen und das ist wichtig, um Unterrichtskonzepte zur modernen Quantenphysik bzw. -optik weiter zu entwickeln.

Die Schülerantworten wurden auf Grundlage von deduktiv und induktiv gewonnener Kategorien ausgewertet. Die deduktiv gewonnen Kategorien leiten sich aus bestehenden Projekten der Schülervorstellungsforschung ab. Man findet sie in Anhang G dieser Arbeit. Für jede Schülerin und jeden Schüler konnten mehrere Kategorien zutreffen, wenn entsprechende Äußerungen gemacht wurden. Die am häufigsten aufgetretene Kategorie war *Quanteneffekte*. 68% (17 von 25) der Befragten nannten Aspekte, wie den Quantenzufall, die Antikorrelation oder die Nichtlokalität als das, was für sie die Quantenwelt ausmacht.

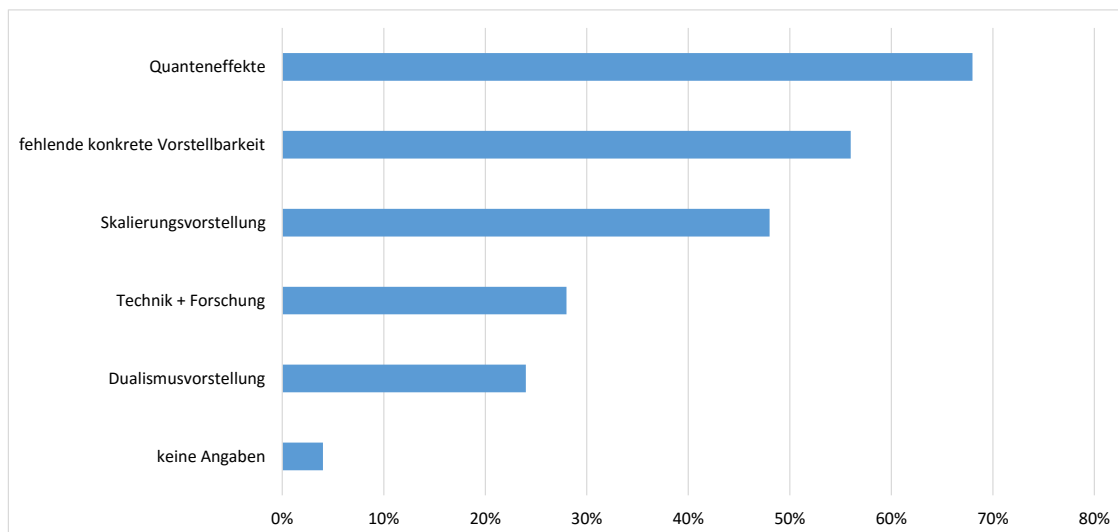


Abbildung 11.1: Übersicht darüber, wie viel Prozent der Probanden Äußerungen machten, die in die jeweilige Kategorie fallen ($\kappa \in [0.68; 1.00]$). Abbildung bereits publiziert in [12].

Es ist auffällig, dass zwar 48% (12 von 25) der Schülerinnen und Schüler die Quantenphysik im Sinne einer *Skalierungsvorstellung* beschreiben und auch so sprechen, dass aber auch bei 56% (14 von 25) der Befragten die Notwendigkeit von Einschränkungen geäußert werden, man könne sich Quantenobjekte nicht als klassische Teilchen oder Partikel vorstellen (*fehlende konkrete Vorstellbarkeit*). Immerhin bei 24% (6 von 25) der Lernenden sind Äußerungen für beide Kategorien gleichzeitig feststellbar, z.B.:

I: „[...] Was ist eigentlich Quantenphysik, was macht für dich die Quantenphysik und die Quantenwelt aus, was würdest du auf die Frage sagen?“

11.1. VORSTELLUNGEN ZUR QUANTENWELT

B20: *„Ja also ich finde [...], die Arbeit mit den ich sage mal kleinsten Teilen, die man sich vorstellen kann, beziehungsweise die man sich nicht vorstellen kann [...] also ja genau, die Dinge die man sich halt, die kleinsten Teilbauteile der kleinsten Bauteile sozusagen.“*

Häufig - in 48% der Fälle (12 von 25) - machen Befragte Äußerungen, die in die Kategorien *Quanteneffekte* und *keine Vorstellbarkeit* fallen. Ein χ^2 -Test wird statistisch signifikant ($\chi^2(1) = 4.70, p = 0.03$), sodass davon auszugehen ist, dass diese beiden Vorstellungen nicht unabhängig voneinander auftreten, das heißt: Lernende, die die Quantenwelt via Quanteneffekten beschreiben, sind sich auch häufig darüber im Klaren, dass Quantenobjekten keine Gestalt im klassischen Sinn zuzuordnen ist. Die Effektstärke für zwei nominal skalierte Variablen kann mittels des Phi-Koeffizienten angegeben werden und liegt hier bei $\varphi = 0.43$, was für einen mittleren Effekt spricht [42].

Immerhin 28% (7 von 25) der Befragten gaben an, die Quantentheorie liefere Potential für Technik und Forschung und die Befragten rekurrten dabei insbesondere auf Quantencomputer und -kryptographie:

I: *„[...] Dann würde ich sagen, wir starten gleich und meine erste Frage wäre, dass du doch mal bitte beschreiben mögest, was für dich die Quantenwelt eigentlich ausmacht.“*

B9: *„[...] oder was ja auch die Einführung war in das Thema, das mit der Datensicherheit und die Quantencomputer und deswegen glaube ich, dass die Quantenphysik auch unsere Zukunft eigentlich sein wird, dass wir irgendwann auch einmal gar nicht mehr ohne können. Und das Verständnis dahinter.“*

Solche Überlegungen belegen das Bewusstsein für die Bedeutung von Quantenphysik für moderne Technologien heute und vor allem in Zukunft. Um eine genauere Übersicht zu bekommen, welche Typen von Schülervorstellungen sich zeigen, muss analysiert werden, welche Kategorien besonders häufig gemeinsam auf Lernende zutreffen. Dies wurde mittels Clusteranalysen explorativ untersucht. Die Ergebnisse werden nachfolgend berichtet.



Mit Hilfe des Datensatzes, der durch Kodierung aller Schülerantworten entsteht, können Clusteranalysen gerechnet werden. Dazu greift man die Kategorien als Variablen auf, die dichotom kodiert werden: 0 entspricht „Kategorie liegt nicht vor“, 1 bedeutet „Kategorie liegt vor“. Mit der Durchführung einer Clusteranalyse sollten explorativ Gruppen von Lernenden gefunden werden, die über ähnliche Vorstellungen verfügen. Inhaltlich interpretierbare Cluster helfen dabei, auftretende Typen von Schülervorstellungen charakterisieren zu können. Genauer kann in diesem Fall sogar gesagt werden, welcher Prozentsatz der Befragten welchem Cluster zugeordnet werden kann.

Zur Bestimmung der optimalen Clusterzahl wurden hierarchisch-agglomerative Clustermethoden eingesetzt, Details zum Verfahren, der gewählten Metrik und dem verwendeten Fusionierungsalgorithmus wurden in Kapitel 7 dieser Arbeit dargestellt. Auf

11.1. VORSTELLUNGEN ZUR QUANTENWELT

Grundlage der gefundenen Clusterlösung mittels Dendrogramm [7] wurden partitionierende Clusteranalysen zur Clustereinteilung genutzt (K-Means-Clusteranalyse). In diesem Fall zeigte sich eine Drei-Cluster-Lösung am geeignetsten und die Clustereinteilung entnimmt man nachfolgender Tabelle:

| ProbandIn | Geschl | Skalvorst. | DualModell | Quaneff | TechnFors | konkrVorst. | Cluster |
|---------------|--------|------------|------------|---------|-----------|-------------|---------|
| 1 | m | x | | | x | | 2 |
| 2 | m | | | x | | | 1 |
| 3 | m | x | x | | | | 3 |
| 4 | w | x | | x | | x | 3 |
| 5 | m | x | x | x | | x | 3 |
| 6 | w | | | x | x | | 1 |
| 7 | m | x | | | | | 3 |
| 8 | w | | | x | x | | 1 |
| 9 | w | x | | | x | | 2 |
| 10 | m | | | x | | x | 1 |
| 11 | m | x | x | | | | 3 |
| 12 | w | | | x | x | x | 1 |
| 13 | w | x | | x | | x | 3 |
| 14 | w | | | x | | x | 1 |
| 15 | m | | | x | | | 1 |
| 16 | m | x | | x | | | 3 |
| 17 | w | | | x | | x | 1 |
| 18 | m | x | | | | x | 3 |
| 19 | w | | x | x | | x | 1 |
| 20 | m | x | | x | | x | 3 |
| 21 | w | | | | x | | 2 |
| 22 | m | | x | | x | x | 2 |
| 23 | m | x | | x | | x | 3 |
| 24 | m | | x | x | | x | 1 |
| 25 | m | | | x | | x | 1 |
| Anzahl | | 12 | 6 | 17 | 7 | 14 | |
| in % | | 48% | 24% | 68% | 28% | 56% | |

Abbildung 11.2: Ergebnisse der Kodierung aller Schülerantworten und Clustereinteilung in der Übersicht. Die Zeilen der Befragten, die dem gleichen Cluster zugeordnet werden, sind mit der gleichen Farbe eingefärbt [12].

11.1. VORSTELLUNGEN ZUR QUANTENWELT

Die nachfolgende Tabelle zeigt, wie viel Prozent der Befragten innerhalb der drei Cluster Aussagen machten, die den jeweiligen Kategorien zugeordnet werden können.

| Cluster | # SuS | Skalvorst. | DualModell | Quaneff | TechnFors | konkrVorst. |
|---------|-------|------------|------------|---------|-----------|-------------|
| 1 | 11 | 0% | 19% | 100% | 27% | 64% |
| 2 | 4 | 50% | 25% | 0% | 100% | 25% |
| 3 | 10 | 100% | 30% | 60% | 0% | 60% |

Tabelle 11.1: Zusammenfassung der drei Cluster zu den Vorstellungen über die Quantenwelt und die Quantenphysik. Dargestellt ist jeweils die Zahl der Lernenden pro Cluster (# SuS), sowie der prozentuale Anteil (gerundet) der Befragten innerhalb des Clusters, die bei ihren Antworten solche Äußerungen machten, die den jeweiligen Kategorien (Skalvorst., DualModell, ...) zugeordnet werden konnten.



Hier und in den Folgeabschnitten werden statistisch gefundene Cluster inhaltlich interpretiert. Zur Einschätzung der Aufteilung von Jungen und Mädchen auf die Cluster werden prozentuale Angaben gemacht, z.B.: „27% der Jungen fallen in dieses Cluster“. Nur diese prozentualen Angaben ermöglichen einen Vergleich der Aufteilung von Mädchen und Jungen auf die Cluster, weil die jeweilige Grundgesamtheit unterschiedlich ist ($N_{\text{♀}} = 10 < 15 = N_{\text{♂}}$) und ein Vergleich von Absolutzahlen daher nicht möglich ist. Die prozentualen Angaben sind aber aufgrund der kleinen Grundgesamtheit mit Vorsicht zu genießen, sodass trotzdem auch hier die Absolutzahlen in Klammern angegeben werden, wie bisher auch immer.

Die drei Cluster können inhaltlich wie folgt interpretiert werden:

C1: Primär elaborierte Vorstellung. Schülerinnen und Schüler dieses Clusters charakterisieren die Quantenwelt in 100% der Fälle via solcher Effekte oder Aspekte, die es in der klassischen Physik nicht gibt, beispielsweise mit fehlendem Determinismus oder Antikorrelation. Keiner der Lernenden in diesem Cluster äußert Gedanken zu einer Skalierungsvorstellung, spricht also über Quantenobjekte als „kleinste Teilchen“ im klassischen Sinn. Stattdessen betonen 7 der Befragten in diesem Cluster ganz explizit, dass man Quantenobjekte mit Objekten der klassischen Physik nicht vergleichen kann und daher eine bildliche Veranschaulichung zwar erlaubt sein mag, aber nicht mit der Realität verwechselt werden kann. 27% (3 von 11) der Lernenden in diesem Cluster beziehen die Bedeutung der Quantenphysik für Technik und Forschung in ihre Antworten mit ein. In diesem Cluster werden 11 der Probanden zusammengefasst, was einem Anteil von 44% entspricht. 60% (6 von 10) aller Mädchen haben solche elaborierten Vorstellungen zur Quantenwelt, aber nur ein Drittel der Jungen (5 von 15).

C2: Quantenwelt als Welt der Technik. Schülerinnen und Schüler dieses Clusters charakterisieren die Quantenwelt in 100% der Fälle über ihre Bedeutung für Technik und Forschung, beispielsweise im Bezug auf Quantencomputer oder Quanten-

kryptographie. Keiner der Lernenden in diesem Cluster äußert Gedanken, die sich konkret auf Quanteneffekte beziehen, aber 50% machen Äußerungen, die für eine Skalierungsvorstellung sprechen. Dabei betont nur ein Schüler des Clusters ganz explizit, dass man Quantenobjekte mit Objekten der klassischen Physik nicht vergleichen kann und daher eine bildliche Veranschaulichung zwar erlaubt sein mag, aber nicht mit der Realität verwechselt werden kann. In diesem Cluster werden 4 der Probanden zusammengefasst, was einem Anteil von 16% entspricht. 20% (2 von 10) aller Mädchen haben solche Vorstellungen zur Quantenwelt und 13% der Jungen (2 von 15).

C3: Quantenwelt als klassische Welt auf kleiner Skala mit Abstrichen. Schülerinnen und Schüler dieses Clusters charakterisieren die Quantenwelt in 100% der Fälle über eine klar artikulierte Skalierungsvorstellung. Sie denken über Quantenobjekte als die „kleinsten Partikel“, die „zu klein sind, als dass man sie sehen könnte“ und die „Teilbausteine der kleinsten Bausteine“ seien. Dabei ist aber zu betonen, dass dies nicht immer einhergeht mit einer Vorstellung von Quantenobjekten als klassische „Teilchen“. Immerhin 60% (6 von 10) der Befragten dieses Clusters betonen sogar, dass bildliche Vorstellungen von Quantenobjekten nicht adäquat möglich sind. Keiner der Lernenden in diesem Cluster äußert Gedanken, die sich konkret auf die Bedeutung der Quantenphysik für Technik und Forschung beziehen. In diesem Cluster werden 10 der Probanden zusammengefasst, was einem Anteil von 40% entspricht. Nur 20% (2 von 10) aller Mädchen haben solche Vorstellungen zur Quantenwelt, aber mit 53% über die Hälfte der Jungen (8 von 15).

11.2 Vorstellungen zum statistischen Verhalten

Die Wahrscheinlichkeitsinterpretation der Quantenphysik führt bei Lernenden häufig zu einer Unzufriedenheit [175, S. 215]. Schülerinnen und Schüler erklären sich diese oftmals mit einer „unzureichenden Möglichkeit zur Beschreibung von quantenphysikalischen Phänomenen“ [175, S. 215]. Ein Teil der Leitfadeninterviews bezog sich deswegen ganz konkret auf das statistische Verhalten von Quantenobjekten, sowie auf den Quantenzufall. Damit wurde auch auf den fehlenden Determinismus und die Objektivität des Zufalls in der Quantenphysik rekurriert. Die Vorstellungen der Lernenden wurden wieder verschiedenen Kategorien zugeordnet, die im Anhang G im Detail erläutert sind.

84% (21 von 25) der Befragten äußerten sich explizit dazu, dass um statistische Aussagen in der Quantenphysik treffen zu können, stets die Betrachtung von Ensembles von Quantenobjekten notwendig ist. Dabei kam es in allen bis auf einem Fall dazu, dass die Schüler ganz konkret auf die Objektivität des zugrunde liegenden Zufalls Bezug nahmen. Ein χ^2 -Test wird statistisch signifikant ($\chi^2(1) = 9.44, p < 0.01$), sodass davon auszugehen ist, dass diese beiden Aspekte tendenziell nicht unabhängig voneinander in den Vorstellungen der Lernenden verankert sein dürften. Lernende, denen bewusst ist, dass statistische Aussagen nicht Einzelereignisse, sondern eine Menge von Messungen betreffen, scheinen damit auch an absoluten Zufall im Kontext der Quantenphysik zu denken. Die Effektstärke liegt bei $\phi = 0.70$, sodass von einem starken Zusammenhang

11.2. VORSTELLUNGEN ZUM STATISTISCHEN VERHALTEN

ausgegangen werden kann [42]:

B7: *„Nun, meiner Meinung nach bezieht sich das [die statistischen Aussagen] darauf, dass es in der Quantenmechanik so echte Zufälle gibt und man kann halt eben sagen, dass wenn man jetzt eben eine große Anzahl von Einzelphotonen nacheinander an den Strahlteiler, z.B. schießt, die zwar am Ende nach dem Gesetz der Großen Zahl ungefähr Hälfte-Hälfte transmittiert und reflektiert werden, aber man kann eben nicht für ein einzelnes Photon an sich bestimmen, ob es transmittiert oder reflektiert wird.“*

Sieben der 25 Befragten sprechen über Wahrscheinlichkeiten und Zufall im Kontext von Ortsangaben, also zum Beispiel um Aufenthalts- oder Auftreffwahrscheinlichkeiten zu beschreiben:

I: *„[Beschreib mal] einfach ein Experiment, in dem man Quantenzufall finden kann.“*

B9: *„Ja ich würde jetzt einfach mal vom Doppelspaltexperiment vielleicht ausgehen, da man ja da ein Interferenzmuster sieht, das eben, wo man nicht genau bestimmen kann, wo sich die Quanten danach aufhalten oder durch welchen Spalt sie wirklich fliegen [...]“*

Drei Schülerinnen und Schüler äußern, wie eingangs erwähnt, Unzufriedenheit mit der Wahrscheinlichkeitsinterpretation. Sie ließen in ihren Ausführungen Zweifel anklingen, ob es nicht doch Informationen geben könnte, mit denen die Notwendigkeit der statistischen Beschreibung quantenphysikalischer Phänomene aufgelöst werden könnte. Solche Äußerungen wurden einer Kategorie zugeordnet, die *verborgene Parameter* genannt wurde. Ein Beispiel ist das Folgende:

B11: *„Ich bin eher ein Determinist und ich würde sagen, dass wir nicht genug Wissen haben, also ich würde schon sagen, dass halt, dass äh, dass es eine Sache ist und man könnte, und man könnte diese Sache rein theoretisch vorhersagen, wenn man die ganze Information hat. Dass nur halt wir diese Information nicht lesen können. [...]“*

Die Verteilung der Schülerantworten auf die einzelnen Kategorien ergibt zusammengefasst folgendes Bild:

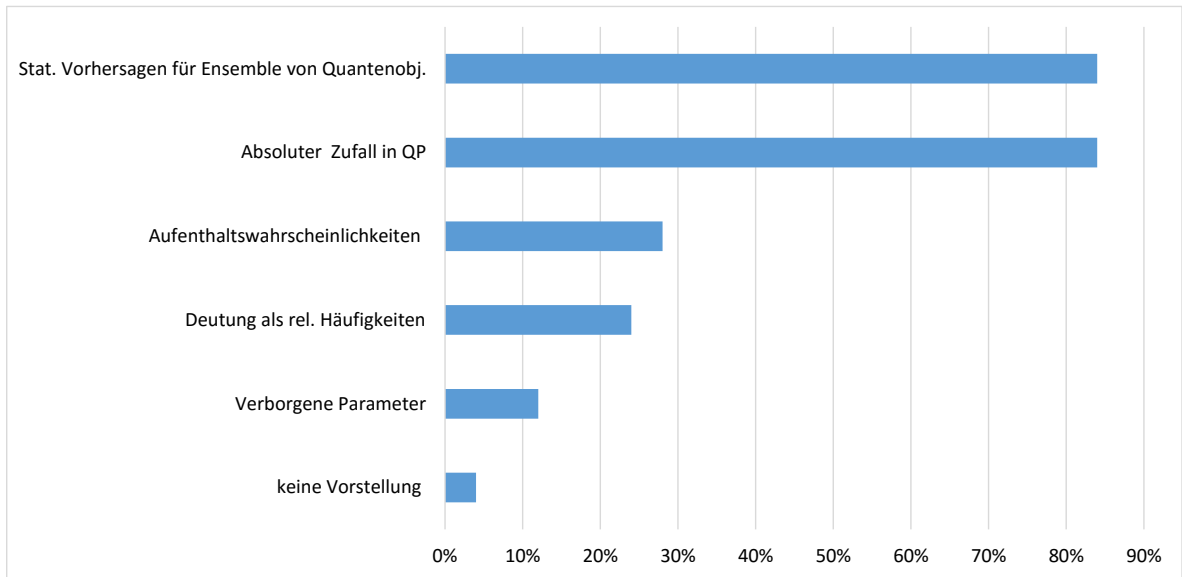


Abbildung 11.3: Übersicht darüber, wie viel Prozent der Probanden Äußerungen machten, die in die jeweilige Kategorie fallen ($\kappa \in [0.78; 1.00]$).

Um eine genauere Übersicht zu bekommen, welche Typen von Schülervorstellungen sich zeigen, wurden wieder Clusteranalysen gerechnet und zwar nach dem gleichen Vorgehen, wie oben und in Kapitel 7 beschrieben. Die Ergebnisse werden nachfolgend berichtet.

11.2. VORSTELLUNGEN ZUM STATISTISCHEN VERHALTEN

Wieder zeigte sich eine Drei-Cluster-Lösung inhaltlich am geeignetsten und die Clustereinteilung entnimmt man nachfolgender Tabelle:

| ProbandIn | Geschl | Aufenthtwsl. | VerborgPar | relHäufig | VorherEns | absZufall | keineVorst | Cluster |
|---------------|--------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|------------|---------|
| 1 | m | | | x | x | x | | 1 |
| 2 | m | x | | | x | x | | 3 |
| 3 | m | x | | | x | x | | 3 |
| 4 | w | | | | x | x | | 2 |
| 5 | m | | x | | x | x | | 2 |
| 6 | w | | | | x | x | | 2 |
| 7 | m | | | x | x | x | | 1 |
| 8 | w | | | x | x | x | | 1 |
| 9 | w | x | | | x | x | | 3 |
| 10 | m | | | | x | x | | 2 |
| 11 | m | | x | | | | | 2 |
| 12 | w | | | | x | | | 2 |
| 13 | w | | | | x | x | | 2 |
| 14 | w | | | | | | x | 2 |
| 15 | m | | | x | x | x | | 1 |
| 16 | m | x | x | | x | x | | 3 |
| 17 | w | | | | | x | | 2 |
| 18 | m | | | | x | x | | 2 |
| 19 | w | | | x | x | x | | 1 |
| 20 | m | x | | | x | x | | 3 |
| 21 | w | | | | x | x | | 2 |
| 22 | m | x | | | x | x | | 3 |
| 23 | m | | | x | x | x | | 1 |
| 24 | m | | | | x | x | | 2 |
| 25 | m | x | | | | | | 2 |
| Anzahl | | 7 | 3 | 6 | 21 | 21 | 1 | |
| in % | | 28% | 12% | 24% | 84% | 84% | 4% | |

Abbildung 11.4: Ergebnisse der Kodierung aller Schülerantworten und Clustereinteilung in der Übersicht. Die Zeilen der Befragten, die dem gleichen Cluster zugeordnet werden, sind mit der gleichen Farbe eingefärbt.

Die nachfolgende Tabelle zeigt, wie viel Prozent der Befragten innerhalb der drei Cluster Aussagen machten, die den jeweiligen Kategorien zugeordnet werden können.

| Cluster | # SuS | Aufenthtwsl. | VerborgPar | relHäufig | VorherEns | absZufall |
|---------|-------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 6 | 0% | 0% | 100% | 100% | 100% |
| 2 | 13 | 8% | 15% | 0% | 77% | 69% |
| 3 | 6 | 100% | 17% | 0% | 100% | 100% |

Tabelle 11.2: Zusammenfassung der drei Cluster zu den Vorstellungen zum statistischen Verhalten von Quantenobjekten. Dargestellt ist jeweils die Zahl der Lernenden pro Cluster (# SuS), sowie der prozentuale Anteil (gerundet) der Befragten innerhalb des Clusters, die bei ihren Antworten solche Äußerungen machten, die den jeweiligen Kategorien zugeordnet werden konnten.

Die drei Cluster können inhaltlich wie folgt interpretiert werden:

- C1: Statistische Ensemblesicht.** Schülerinnen und Schüler dieses Clusters äußern sich in 100% der Fälle über die Notwendigkeit der Betrachtung von Ensembles von Quantenobjekten, um statistische Aussagen treffen zu können. Alle unterscheiden Quantenzufall von solchem Zufall, den man aus der klassischen Physik, z.B. vom Würfelwerfen kennt. Keiner der Lernenden in diesem Cluster äußert Gedanken bezüglich potentieller verborgener Parameter. Stattdessen betonen alle die Analyse der relativen Häufigkeiten, die sich für die unterschiedlichen Ausgänge ergeben, wenn man viele Messungen durchführt und ihren Bezug zum Wahrscheinlichkeitsbegriff, mitunter sogar unter Nennung des empirischen Gesetzes der Großen Zahl. In diesem Cluster werden 6 der Probanden zusammengefasst, was einem Anteil von 24% der Befragten entspricht. 20% (2 von 10) aller Mädchen haben solche Vorstellungen zur Quantenwelt und knapp 27% der Jungen (4 von 15).
- C2: Stat. Ensemblesicht mit Einschränkungen.** Auch 10 der 13 Schülerinnen und Schüler dieses Clusters sind sich der Notwendigkeit der Betrachtung von Ensembles von Quantenobjekten zum Treffen statistischer Aussagen bewusst (77%). Die Unterscheidung zwischen Quantenzufall von solchem Zufall, den man aus der klassischen Physik kennt, wird von der großen Mehrheit erläutert (69%). Allerdings neigen Schülerinnen und Schüler dieses Clusters zu Bedenken - 15% (2 von 13) machen Äußerungen hinsichtlich möglicher verborgener Parameter - oder führen den Wahrscheinlichkeitsbegriff zur Lokalisierung von Quantenobjekten ein - aufgrund der Schüleraussagen tendenziell als Ungenauigkeiten der Ortsbestimmung zu interpretieren. Keiner der Lernenden in diesem Cluster äußert sich zu relativen Häufigkeiten im Kontext konkreter Experimente. In diesem Cluster werden 13 der Probanden zusammengefasst, was einem Anteil von 52% entspricht. 70% (7 von 10) aller Mädchen haben solche Vorstellungen zur Quantenwelt und mit immerhin 40% beinahe die Hälfte aller Jungen (6 von 15).
- C3: Wahrscheinlichkeiten im Kontext von Lokalisierung.** Schülerinnen und Schüler dieses Clusters benutzen Wahrscheinlichkeitsaussagen zur Lokalisierung von Quantenobjekten. Stets geht es um räumliche Aspekte, aber die Objektivität des Zufalls und auch der Bedarf einer Menge von Quantenobjekten, über deren Verhalten stat. Aussagen getroffen werden, ist 100% der Schülerinnen und Schüler dieses Clusters klar. Nur ein Lernender dieses Clusters (17%) zeigt Bedenken (VerborgPar). In diesem Cluster werden 6 der Probanden zusammengefasst, was einem Anteil von 24% der Befragten entspricht. Nur 10% (1 von 10) aller Mädchen haben solche Vorstellungen zur Quantenwelt, aber ein Drittel der Jungen (5 von 15).



Die Schülerinnen und Schüler wurden ganz explizit dazu befragt den Aufbau und die Durchführung eines Experiments zu beschreiben, indem das statistische Verhalten von Quantenobjekten gefolgert werden kann. Die Antworten wurden mit minimal 0 und maximal 2 Punkten ohne halbe Punkte bewertet, die Kodierregeln finden sich im Kodierleitfaden in Anhang G. Die Schülerinnen und Schüler erreichten im Mittel 1.36 ± 0.71 Punkte. Nur drei Befragte konnten sich an kein Experiment erinnern. Dass der Großteil der Schülerinnen und Schüler aber sehr wohl ein passendes Experiment mehr oder weniger ausführlich beschreiben konnte, unterstreicht die obigen Ergebnisse: Dass 84% der Befragten die Notwendigkeit der Betrachtung von Ensembles von Quantenobjekten, um statistische Aussagen treffen zu können, eigenständig nennen, ist positiv zu bewerten. Das Gleiche gilt für die Bewertung des Zufalls in der Quantenphysik als objektiv und die Abgrenzung zum Zufall in der klassischen Physik. Auch dies gelang 84% der Lernenden.

11.3 Vorstellungen zur Interferenzfähigkeit einzelner Quantenobjekte

Um die Antworten der Schülerinnen und Schüler zum Thema Interferenzfähigkeit von Quantenobjekten genauer einschätzen zu können, wurde einleitend nach einer Klärung des Begriffs Interferenz gefragt. Die Bewertung der Schülerantworten auf diese Frage wurde mittels einer dreistufigen Skala mit null, einem oder zwei Punkten bewertet. Alle Schülerinnen und Schüler konnten den Begriff erklären. Die Beschreibung eines Experiments mit einzelnen Quantenobjekten, in dem Interferenz beobachtet werden kann, gelang ebenfalls der großen Mehrheit. Nur zwei Befragte konnten nicht eigenständig ein geeignetes Experiment - etwa das Doppelspaltexperiment mit einzelnen Elektronen oder das Michelson-Interferometer-Experiment mit einzelnen Photonen - nennen, aber über der Hälfte (54%) der Lernenden konnte sogar den Aufbau und das Vorgehen bei der Durchführung eines solchen Experiments genau beschreiben. Von 2 möglichen Punkten - die Kodierregeln finden sich im Kodierleitfaden im Anhang G - erreichten die Schülerinnen und Schüler im Mittel 1.66 ± 0.48 Punkte. Es folgte eine Frage, die genaueres Nachdenken über Interferenzmuster in Experimenten mit einzelnen Quantenobjekten bei den Schülerinnen und Schülern anregen sollte, um Vorstellungen und Erkläruster extrahieren zu können. Dazu wurde den Lernenden die Formulierung des Wesenszugs *Fähigkeit zur Interferenz* nach [110] vorgelegt:

„Einzelne Quantenobjekte können zu einem Interferenzmuster beitragen, wenn es für das Versuchsergebnis mehr als eine klassisch denkbare Möglichkeit gibt.“

Die Befragten wurden um eine Beschreibung und Erklärung der Aussage gebeten. Der Leitfaden ermöglichte dem Interviewer solche Rückfragen, die der individuellen Interviewsituation angemessen waren. Dies sorgte dafür, dass sehr genaue Einblicke in die Vorstellungen der Lernenden gewonnen werden konnten.



Eine wichtige Beobachtung bezogen auf diese Aufgabe war, dass 64% (16 von 25) der Befragten Schwierigkeiten beim Verständnis des Teils

„[...] wenn es für das Versuchsergebnis mehr als eine klassisch denkbare Möglichkeit gibt.“

der obigen Aussage hatten. Beispielsweise assoziieren viele Schülerinnen und Schüler mit „mehr als eine [...] denkbare Möglichkeit“ eine Art Dualismusaspekt, wie etwa folgendes Beispiel zeigt:

I: „Kannst du mal [...] beschreiben, was du unter diesen klassisch denkbaren Möglichkeiten verstehst. Zum Beispiel gerne im Fall vom Elektron am Doppelspalt.“

B1: „Ok, also klassisch denkbar, wäre z.B. alle Sachen die mit der klassischen Physik, also nicht mit der Annahme, dass wir ein Elektron als Quantenobjekt haben, sondern ein Elektron quasi als Teilchen oder auch als Welle haben, können wir, sozusagen, klassische Ergebnisse erwarten, d.h., wenn wir ein Teilchen durch einen Spalt schicken, den zu jeder Zeit ein fester Ort zugeordnet werden kann, wie in der klassischen Physik, können wir auch vorhersagen, dass er auf dem Schirm auf dem und dem Punkt auftritt, d.h. man würde hinter dem Schirm bei einem Doppelspalt, praktisch, zwei breitere Spalte erwarten, wo Elektronen dann, sozusagen, auftreffen, wenn man sie als Teilchen auffasst. Als Welle aufgefasst, würde man in der klassischen Physik eben erwarten, dass wie bei Wasserwellen oder anderen Wellen, sich an dem Doppelspalt, wie gesagt, bei dem Phänomen der Interferenz, die Wellen sich überlagern, d.h. man hätte auf dem Schirm hinten Stellen, wo sich die Wellen ganz stark überlagern, das bedeutet, dass dort eine konstruktive Interferenz ist oder auch Stellen, wo wir eine destruktive Interferenz haben, d.h. wo sich die Wellen komplett auslöschen.“

Aus diesem Grund wurde dieser Teil der Aussage gemeinsam mit den Befragten geklärt, wenn sie nicht durch gezielte Nachfragen selbst zu einer Erklärung der Aussage kamen. In diesem Fall war interessant, ob der Übertrag auf das Doppelspalt- oder das Michelson-Interferometer-Experiment gelang, ob die Schülerinnen und Schüler also die Aussage konkret auf die experimentelle Situation transferieren konnten. Das Ergebnis: 25% (4 von 16) gelang ein Übertrag auf das Michelson-Interferometer-Experiment, aber sogar 50% (8 von 16) konnten damit die Situation am Doppelspalt klären. Es stellt sich die Frage, ob der Übertrag nur deshalb öfter auf den Doppelspalt, als auf das Interferometer gelang, weil hier die Trajektorienvorstellung einzelner Quantenobjekte offensichtlicher provoziert wurde?

Wie bereits erwähnt, sollten die Befragten zu Beginn der Fragen zum Thema Interferenz den Begriff klären. Die Definition aller Schülerinnen und Schüler bezog sich

11.3. VORSTELLUNGEN ZUR INTERFERENZFÄHIGKEIT EINZELNER QUANTENOBJEKTE

dabei auf den Aspekt der Überlagerung von Wellen. Diese Definition wurde in den Interviews immer wieder dem Auftreten von Interferenzerscheinungen in Experimenten mit einzelnen Quantenobjekten gegenübergestellt. Damit konnte extrahiert werden, welche Erklärungsmuster die Lernenden entwickelt haben, um die Interferenzfähigkeit einzelner Quantenobjekte plausibel zu machen. Die aufgetauchten Kategorien werden in untenstehender Abbildung zusammengefasst und die genauen Definitionen mit Ankerbeispielen findet man wieder im Kodierleitfaden im Anhang G.

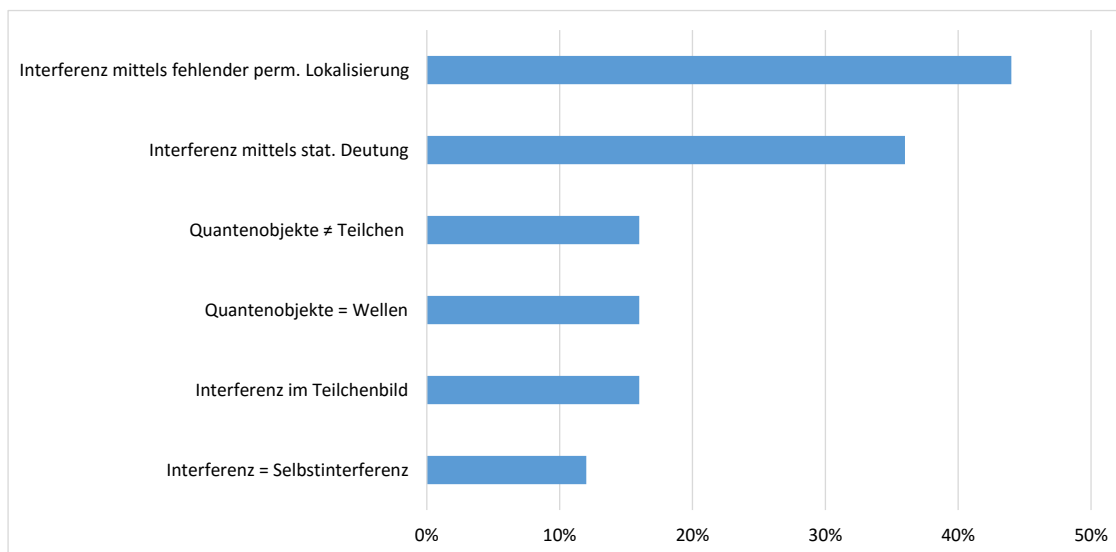


Abbildung 11.5: Übersicht darüber, wie viel Prozent der Probanden Äußerungen machten, die in die jeweilige Kategorie fallen ($\kappa \in [0.83; 1.00]$).

Während nur 12% (3 von 25) die Interferenz von Quantenobjekten im Sinne eine Selbstinterferenz - also in den Augen der Lernenden als sich teilender Quantenobjekte, die mit sich selbst überlagern - erklären, greifen 44% (11 von 25) der Schülerinnen und Schüler zu einer sehr pragmatischen Argumentation: die Interferenz einzelner Quantenobjekte hängt damit zusammen, dass Quantenobjekten keine Trajektorie im klassischen Sinne zugeordnet werden kann.

I: „Was war jetzt die Schlussfolgerung aus diesem Michelson-Interferometer Experiment mit einem Photon? Was haben wir dann für eine Schlussfolgerung gezogen letztlich, im Kontext zu Photonen?“

B25: „Ja wir haben ja gesehen, dass trotzdem Interferenz vorliegt und deswegen haben wir ja gesagt dass man sich halt Photonen quasi nicht als ein Teilchen mit bestimmten Ort vorstellen darf, weil es einfach ungültig ist diese Annahme.“

Ein anderer großer Teil der Befragten, nämlich 36% (9 von 25), begründet das Auftreten von Interferenz in Experimenten mit einzelnen Quantenobjekten mit Hilfe der statistischen Deutung in der Quantenphysik. Schülerantworten, wie die Folgende fallen in diese Kategorie:

I: „Entschuldigung B, ich muss dich nochmal unterbrechen. Wir sprechen von Photonen, ne?“

B10: „Achja, sorry, ja. Photonen. Und wir haben jetzt nun diese Photonen, die auf diesen Spiegel schießen, und, also wir schießen mit diesen Photonen auf diesen Strahlteilerwürfel, [...] dann haben wir nie einen festen klassischen Weg, den das Photon geht, sondern es geht immer den, den es dann gerade entscheidet. Also wir haben eben keinen festen Wert und dadurch entsteht, wenn man es hinten misst, ein Interferenzmuster.“

Ein kleiner übriger Teil von 16% der Befragten setzt an dieser Stelle Quantenobjekte mit Wellen gleich und folgert daraus die Notwendigkeit der Beobachtung von Interferenzphänomenen:

B13: „Na, die können ja eigentlich immer zu einem Interferenzmuster beitragen. Also ja, wenn es Wellen sind und die sich überlagern, dann gibt es ja Interferenz.“

11.4 Vorstellungen zu Photonen

Der dritte Teil der Interviews begann und endete mit einer Frage, die sich ganz konkret auf die gleiche Sache bezog: „Wie stellen sich die Lernenden Photonen vor?“

1. Was ist denn deine Vorstellung zu einem Photon?

und

13. Du als Quantenphysikexperte, bewerte doch einmal, was Einstein hier über Photonen schrieb und sage mir, was für dich Photonen sind: „Nach der hier ins Auge zu fassenden Annahme ist bei Ausbreitung eines von einem Punkte ausgehenden Lichtstrahles die Energie nicht kontinuierlich auf größer und größer werdende Räume verteilt, sondern es besteht dieselbe aus einer endlichen Zahl von in Raumpunkten lokalisierten Energiequanten, welche sich bewegen, ohne sich zu teilen“ [52].

Weil zu unterschiedlichen Zeitpunkten des Interviews mit unterschiedlichen Fragestellungen auf die Vorstellung zum Photon Bezug genommen wurde, sollte sicher gestellt werden, dass im bestmöglichem Umfang die Schülervorstellungen zum Photon aufgedeckt werden konnten. Folgende Vorstellungen wurden gefunden:

11.4. VORSTELLUNGEN ZU PHOTONEN

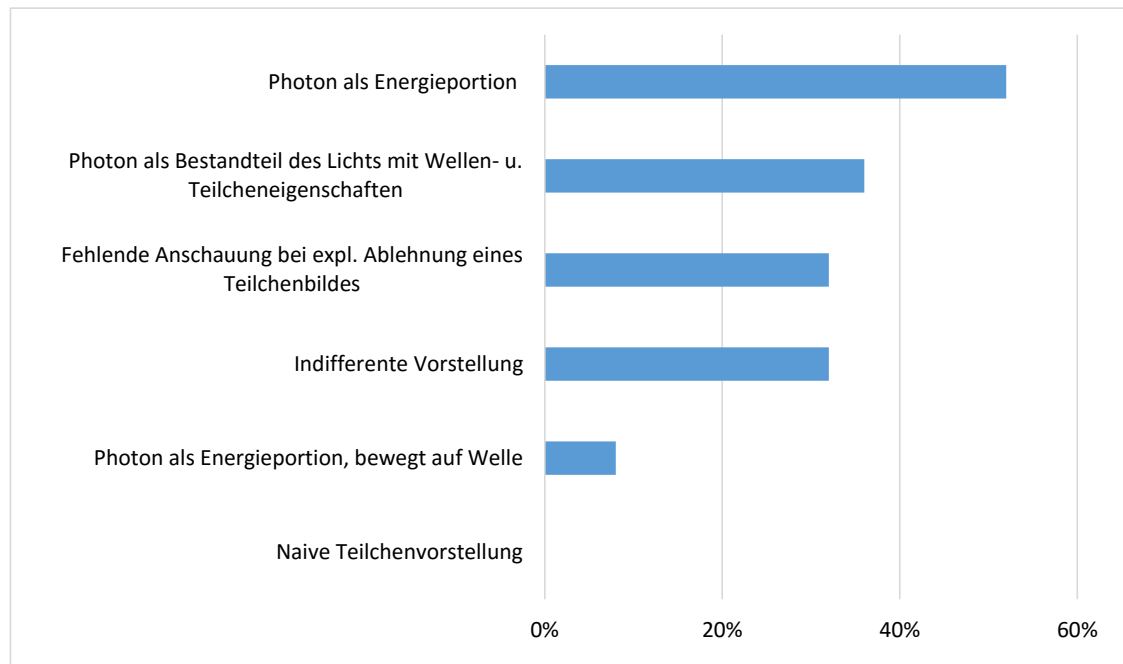


Abbildung 11.6: Übersicht darüber, wie viel Prozent der Probanden Äußerungen machten, die in die jeweilige Kategorie fallen ($\kappa \in [0.69; 1.00]$). Die Definition der Kategorien mit Ankerbeispielen findet sich im Anhang G dieser Arbeit.

Die folgenden Aspekte sind besonders auffällig:

- 32% (8 von 25) der Befragten äußern sich ganz explizit dazu, dass eine Anschauung eines Photons im klassischen Sinn nicht möglich ist und betonen gleichzeitig auch die Ablehnung eines (naiven) Teilchenbildes:

I: „Okay, lassen wir mal so stehen. B., was sind deine Vorstellungen zu einem Photon?“

B19: „[...] Die Frage finde ich sehr schwer zu beantworten weil man, also ich, weil früher habe ich mir die Photonen immer als Teilchen vorgestellt, die halt, so halt irgendwelche Teilchen, die halt in der Luft rumschweben und aus denen halt das Licht besteht, aber haben wir ja erfahren dass es eben nicht sein, dass es eben keine wirklichen Teilchen sind, die einen festen Ort haben, deswegen habe ich jetzt im Moment gerade keine wirklichen Vorstellungen als was ich mir Photonen vorstellen kann, weil es einfach sehr schwierig ist da irgendwas, irgendwie sich das darunter vorzustellen, weil wir sowas eben gar nicht kennen. Und das quasi in unserer Welt gar nicht haben, also in dem was wir so täglich erleben, deswegen habe ich Moment jetzt eigentlich nicht mehr so wirklich eine Vorstellung davon, was also, weil ich, was ich halt, jetzt weiß ich halt dass es keine Kugeln sind die in der Luft rumschweben, aber so eine richtige Vorstellung habe ich gerade nicht davon.“

- Ebenso äußern jedoch 32% (8 von 25) der Befragten indifferente Bedenken: Sie stellen sich Photonen zwar als Teilchen (also als Kugeln o.ä.) vor, beteuern jedoch

zu wissen, dass diese Vorstellung nicht mit einer Realität verwechselt werden kann, z.B.:

I: „Ich bitte dich einfach einmal im ersten Schritt mir zusagen, was ist denn jetzt deine, also deine Vorstellung von einem Photon.“

B3: „Von einem Photon. Also ich muss sagen, es war eigentlich immer schwierig zu sagen. Vielleicht, also ich beziehe mich da jetzt mehr auf den Welle-Teilchen Dualismus, obwohl ich weiß, dass es nicht richtig ist, aber irgendwie, man muss sich ja eben etwas vorstellen, der Kopf denkt ja in Bildern. So ein Teilchen, was auch eine Welle ist. Ich weiß es nicht. Also man kann das ja nicht so sagen, das weiß ich schon, aber ich würde es mir immer als Teilchen vorstellen, glaube ich.“

- 36% (9 von 25) der Befragten verharren bei einer dualistischen Vorstellung, denken sich Photonen als als Bestandteile des Lichts mit Welleneigenschaften, so zum Beispiel bei dem folgenden Interviewauszug festzustellen:

I: „Die andere Aufgabe war deine eigene Bewertung abschließend.“

B8: „Licht hat ja sowohl Wellen- als auch Teilcheneigenschaften, also man kann nicht nur von Teilcheneigenschaften von Licht ausgehen, sondern Licht hat immer noch Welleneigenschaften, das ist der Welle-Teilchen-Dualismus, soll ich über Photonen reden, oder was?“

I: „Ja ich hätte von dir jetzt wissen wollen, ob wenn du sagst Welle-Teilchen-Dualismus, das ist ja ein interessanter Begriff, ob ich mir das jetzt so vorstellen kann, dass Photonen beides sind?“

B8: „Ja, also Elektronen [Photonen] sind quasi sowohl Wellen als auch Teilchen und weisen die Eigenschaften, je nach Anschauung, also je nachdem wie man die Elektronen beachtet, auf. Also wie man sie anschaut, in welchem Experiment. Äh, die Photonen, habe ich Elektronen gesagt? Die Photonen.“

- Die große Mehrheit der Schülerinnen und Schüler - nämlich 52% (13 von 25) - versteht Photonen als Energieportionen des Lichts. Dies sagt nichts über die Anschauung, aber die oben genannten Ergebnisse spiegeln eines klar wieder: eine naive Teilchenvorstellung des Photons wird von keinem der Befragten geäußert. Auch die Vermischung verschiedener Aspekte wird nur in zwei Fällen beobachtet: 8% (2 von 25) der Befragten stellen sich Photonen nämlich als Teilchen vor, die sich entlang einer Welle bewegen, z.B.:

I: „Okay, dann machen wir mal weiter. Was ist denn deine Vorstellung zu einem Photon?“

B23: „Naja, eine Art Energieportion, das sich hier eben durch den, den Raum bewegt mit einer Welle.“

I: „Das musst du jetzt mal ein wenig genauer beschreiben.“

B23: „Naja, also wir haben sozusagen ein Photon, stell ich mir so vor als ob es eben Energie wäre, das sozusagen, ja, durch den Raum fliegt und diese Energie bewegt sich nicht gerade durch, durch den Raum sondern eben in Wellenform.“

11.4. VORSTELLUNGEN ZU PHOTONEN

Die Eigenschaften, die die Befragten Photonen zuordnen, sind im nachfolgenden Diagramm dargestellt:

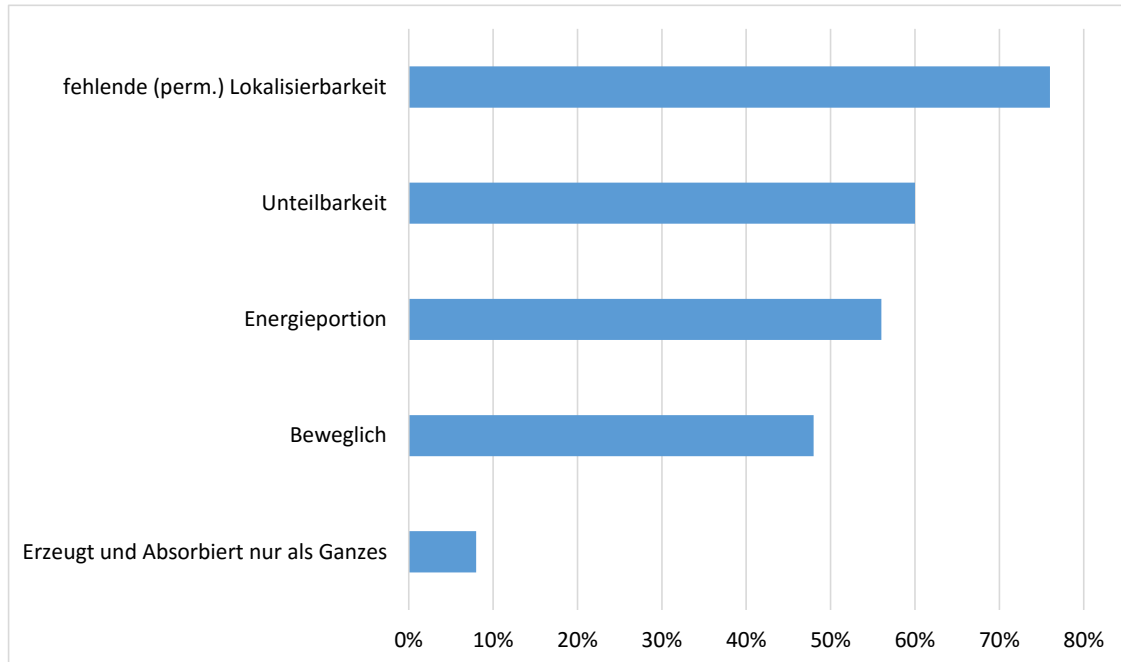


Abbildung 11.7: Eigenschaften, die die Befragten Photonen zuschreiben. Es zeigt sich: Die Diskussion der Eigenschaft Ort in der Intervention scheint starken Einfluss auf die Sichtweise von Photonen zu haben.

Clusternalytisch konnten mit den bereits mehrfach beschriebenen Verfahren drei inhaltlich interpretierbare Cluster extrahiert werden. Mit diesen können die Typen von Schülervorstellungen zusammengefasst werden. Die Clustereinteilung entnimmt man nachfolgender Tabelle:

11.4. VORSTELLUNGEN ZU PHOTONEN

| ProbandIn | Geschl | NaivTeil | TeildLi | Energiequ | IndiffVorst | AbITeil | EnergieWe | Cluster |
|---------------|--------|----------|---------|-----------|-------------|---------|-----------|---------|
| 1 | m | | | x | | x | | 1 |
| 2 | m | | x | | | | | 2 |
| 3 | m | | x | | x | x | | 2 |
| 4 | w | | | x | x | | | 3 |
| 5 | m | | x | x | | | | 2 |
| 6 | w | | | x | | | | 1 |
| 7 | m | | | x | x | | | 3 |
| 8 | w | | x | x | | x | | 2 |
| 9 | w | | x | | | x | | 2 |
| 10 | m | | x | | | | | 2 |
| 11 | m | | x | | | | | 2 |
| 12 | w | | | | x | | | 3 |
| 13 | w | | | | | x | | 1 |
| 14 | w | | | x | x | | | 3 |
| 15 | m | | x | | | | | 2 |
| 16 | m | | | x | x | | | 3 |
| 17 | w | | | x | | | | 1 |
| 18 | m | | x | | | x | | 2 |
| 19 | w | | | | | x | | 1 |
| 20 | m | | | x | | x | | 1 |
| 21 | w | | | x | | | | 1 |
| 22 | m | | | x | | | | 1 |
| 23 | m | | | x | | | x | 1 |
| 24 | m | | | | x | | x | 3 |
| 25 | m | | | | x | | | 3 |
| Anzahl | | 0 | 9 | 13 | 8 | 8 | 2 | |
| in % | | 0% | 36% | 52% | 32% | 32% | 8% | |

Abbildung 11.8: Ergebnisse der Kodierung aller Schülerantworten und Clustereinteilung in der Übersicht. Die Zeilen der Befragten, die dem gleichen Cluster zugeordnet werden, sind mit der gleichen Farbe eingefärbt.

Die nachfolgende Tabelle zeigt, wie viel Prozent der Befragten innerhalb der drei Cluster Aussagen machten, die den jeweiligen Kategorien zugeordnet werden können.

| Cluster | # SuS | TeildLi | Enerqu | IndiffVor | AbITeil | EnerWe |
|---------|-------|---------|--------|-----------|---------|--------|
| 1 | 9 | 0% | 78% | 0% | 44% | 11% |
| 2 | 9 | 100% | 22% | 11% | 44% | 0% |
| 3 | 7 | 0% | 57% | 100% | 0% | 14% |

Tabelle 11.3: Zusammenfassung der drei Cluster zu den Vorstellungen über Photonen. Dargestellt ist jeweils die Zahl der Lernenden pro Cluster (# SuS), sowie der prozentuale Anteil (gerundet) der Befragten innerhalb des Clusters, die bei ihren Antworten solche Äußerungen machten, die den jeweiligen Kategorien zugeordnet werden konnten.

Die drei Cluster können inhaltlich wie folgt interpretiert werden:

C1: Elaborierte Energiequantvorstellung. Schülerinnen und Schüler dieses Clusters bezeichnen Photonen in 78% der Fälle als Energieportionen oder Energiequanten (7 von 9). Dabei tauchen keinerlei Äußerungen auf, die für indifferente Vorstellungen sprechen oder Argumente dafür liefern, dass sich die Lernenden Photonen

11.5. VORSTELLUNGEN ZUR EIGENSCHAFT ORT IN DER QUANTENPHYSIK

als Lichtteilchen mit Welleneigenschaften vorstellen. Dem entgegen stehen 44% der Befragten dieses Clusters (4 von 9), die gar eine Teilchenvorstellung explizit ablehnen. In diesem Cluster werden 9 der Probanden zusammengefasst, was einem Anteil von 36% der Befragten entspricht. Die Hälfte aller Mädchen (5 von 10) hat solche Vorstellungen zu Photonen, aber nur knapp 27% der Jungen (4 von 25).

C2: Photon als Lichtteilchen. Genau umgekehrt als bei C1 sind die Geschlechterverhältnisse in diesem Cluster: Während nur 20% (2 von 10) aller Mädchen diesem Cluster zugeordnet sind, trifft das mit 47% für knapp die Hälfte aller Jungen zu (7 von 15). Die 9 Befragten in diesem Cluster denken Photonen als Bestandteile des Lichts. Zwar lehnen 44% (4 von 9) eine naive Teilchenvorstellung ab, aber dualistische Vorstellung dominieren. Nur 22% (2 von 9) der Schülerinnen und Schüler dieses Clusters charakterisieren Photonen als Energiequanten und nur 11% (1 von 9) äußern Bedenken bezüglich einer Teilchenvorstellung des Photons.

C3: Energiequant in Teilchengestalt. Schülerinnen und Schüler dieses Clusters bezeichnen Photonen in 57% (4 von 7) der Fälle als Energieportionen oder Energiequanten. Anders als in Cluster 1 hingegen, machen alle 7 Befragten dieses Clusters Aussagen, die für indifferente Vorstellungen sprechen: Das heißt, den Probanden in diesem Cluster ist zwar bewusst, dass Photonen nicht mit Teilchen - also z.B. Kugeln - gleichzusetzen sind, sie stellen sich diese aber als solche vor. 14% (1 von 7) denken Photonen sogar als solche Teilchen, die sich auf einer Welle bewegen. Der Anteil der Mädchen und Jungen in diesem Cluster ist in etwa ausgeglichen: 30% (3 von 10) aller Mädchen haben solche Vorstellung und rund 27% aller Jungen (4 von 25).

11.5 Vorstellungen zur Eigenschaft Ort in der Quantenphysik

In diesem Abschnitt soll auf Vorstellungen zur Eigenschaft Ort in der Quantenphysik Bezug genommen werden. Welche Assoziationen mit der Eigenschaft Ort in der Quantenphysik stellen die Befragten dar?

Um diese Frage vor dem Hintergrund der Diskussion über Photonen und Interferenzphänomene klären zu können, beinhaltete der Interviewleitfaden die folgenden Fragen:

Jemand behauptet, dass ein Photon im Doppelspalt-Experiment immer entweder durch den rechten oder durch den linken Spalt geht. Wie würdest du ihn widerlegen? (aus [143, S. 145])

und

Was verstehst du im Zusammenhang von Photonen unter dem Begriff „Ort“?

Widmen wir uns zunächst den Ergebnissen zur ersten Frage: Die Argumentationsmuster, um die Aussage, ein Photon würde im Doppelspaltexperiment stets durch einen der

11.5. VORSTELLUNGEN ZUR EIGENSCHAFT ORT IN DER QUANTENPHYSIK

Spalte gehen, zu widerlegen, sind in die folgenden - induktiv aus dem Datenmaterial gefundenen - Kategorien unterteilbar (vgl. Anhang G):

- Ablehnung der Aussage, weil es eine dritte Möglichkeit gibt: das Photon trifft auf den Spaltzwischenraum.
- Ablehnung der Aussage, weil eine Trajektorienvorstellung für das Photon unzulässig ist.
- Ablehnung der Aussage, weil man dann zwei Auftrefforte hinter dem Doppelspalt feststellen würde, aber stattdessen ein Interferenzmuster beobachten kann.
- Keine plausible Argumentation zur Aussage möglich.

Die prozentualen Anteile der jeweiligen Kategorien sind im nachstehenden Diagramm gezeigt:

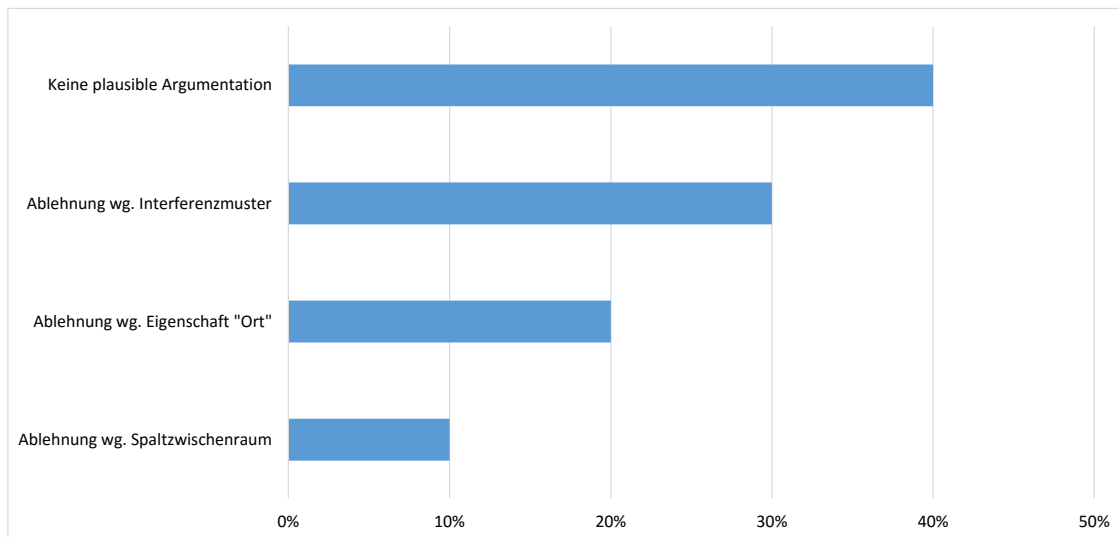


Abbildung 11.9: Argumentationsmuster zur Aussage „Jemand behauptet, dass ein Photon im Doppelspalt-Experiment immer entweder durch den rechten oder durch den linken Spalt geht. Wie würdest du ihn widerlegen?“

Bezogen auf die Frage

Was verstehst du im Zusammenhang von Photonen unter dem Begriff „Ort“?

konnten ebenfalls unterschiedliche - teilweise deduktiv von [220, 9] übernommene, teilweise induktiv ergänzte - Kategorien gebildet werden. Diese sind im Koderleitfaden mit Definitionen und Ankerbeispielen detailliert beschrieben und können in Anhang G dieser Arbeit nachgelesen werden.

11.5. VORSTELLUNGEN ZUR EIGENSCHAFT ORT IN DER QUANTENPHYSIK

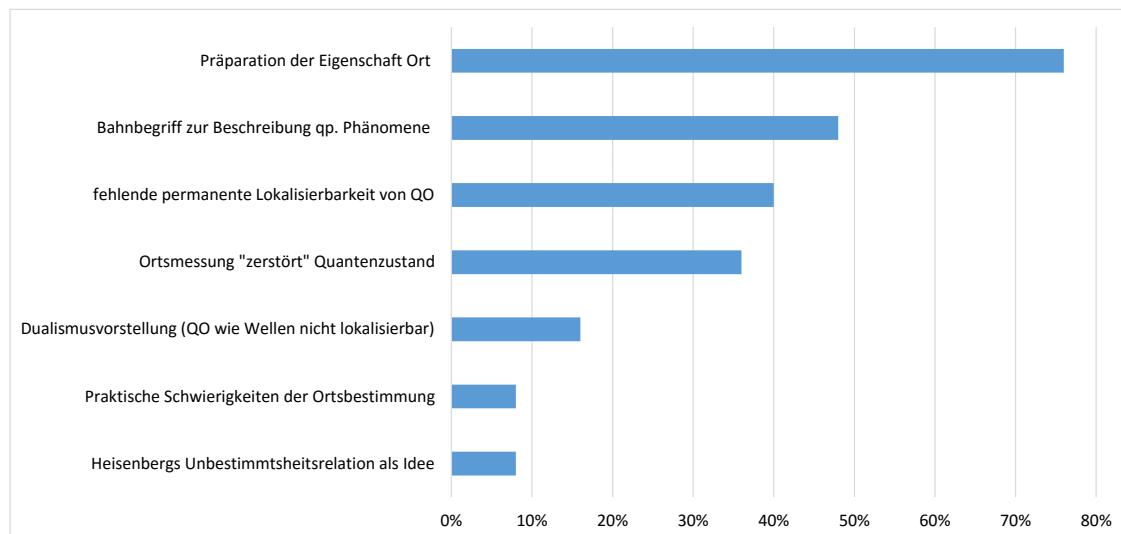


Abbildung 11.10: Vorstellungen zur Eigenschaft Ort in der Quantenphysik im Überblick ($\kappa \in [0.63; 1.00]$).

Obwohl 40% (10 von 25) der Schülerinnen und Schüler hervorheben, dass Quantenobjekten nicht permanent die klassisch wohldefinierte Eigenschaft Ort zugewiesen werden kann, verwenden dennoch 48% (12 von 25) der Befragten einen Bahnbegriff zur Beschreibung quantenphysikalischer Phänomene oder Experimente, z.B. so:

B5: „ja wenn ich zum Beispiel Fußbälle oder andere kleinere Teilchen auf den Doppelspalt schicken würde, dann würden wir auch nur zwei (..) zwei, wie sagt man (..) zwei Streifen messen oder zwei Messungen bekommen. Und in der Quantenwelt ist es ja eben, dass es so, dass die einzelnen Quanten durch beide Spalte gleichzeitig gehen scheinbar, obwohl es jetzt eigentlich nur ein Quantenobjekt ist.“

Die Menge der Schülerinnen und Schüler, die von sich aus gleichermaßen eine fehlende permanente Lokalisierung von Quantenobjekten ansprechen und trotzdem über Trajektorien von Quantenobjekten reden, ist leer.

Über drei Vierteln der Lernenden - nämlich 19 Befragten (76%) - ist der Präparationsgedanke klar, denn er wird ohne gezielte Nachfrage artikuliert. 10 davon widersprechen gleichzeitig einer permanenten Lokalisierung von Quantenobjekten. Ein χ^2 -Test wird statistisch höchst signifikant ($\chi^2(1) = 5.27, p < 0.001$), sodass davon auszugehen ist, dass diese beiden Aspekte nicht unabhängig voneinander in den Vorstellungen der Lernenden verankert sind. Lernende, denen die Notwendigkeit der Präparation von Eigenschaften in der Quantenphysik bewusst ist, widersprechen tendenziell auch einer permanenten Lokalisierung von Quantenobjekten. Die Effektstärke liegt bei $\phi = 0.46$, sodass von einem mittleren Zusammenhang ausgegangen werden kann [42]. 9 der 19 Lernenden, die Präparationsgedanken eigenständig äußern, erläutern ferner, dass eine quantenphysikalische Ortsmessung durch eine Koinzidenzmessung realisiert werden kann, die aber den Quantenzustand zerstört, etwa weil das Photon seine Energie bei Messung im Detektor deponiert:

11.5. VORSTELLUNGEN ZUR EIGENSCHAFT ORT IN DER QUANTENPHYSIK

I: „[...] Was verstehst du im Zusammenhang vom Begriff Photonen unter dem Begriff Ort?“

B1: „Wir haben ja jetzt schon ganz viel darüber geredet, dass eigentlich Photonen nicht permanent einen Ort besitzen aber in diesem Fall, bei der Koinzidenz ist es so, dass man dem Photon, zu dem Zeitpunkt, wo die Photonen oder das einzelne Photon in dem Detektor detektiert wird und der Detektor klickt, kann es in dem Fall, sozusagen, ein Ort zugewiesen werden, aber allgemein ist das dann auch wieder schwierig, weil nachdem das Photon, sozusagen, wieder detektiert wurde ist das Photon dann wieder sofort verschwunden, weil es ja die ganze Energie, sozusagen, auf das Elektron übergibt, auf ein Elektron und dann ist es wieder weg.“

Auch hier wird ein χ^2 -Test statistisch signifikant ($\chi^2(1) = 6.38$, $p = 0.01$), sodass davon auszugehen ist, dass diese beiden Aspekte nicht unabhängig voneinander in den Vorstellungen der Lernenden verankert sind. Lernende, denen die Notwendigkeit der Präparation von Eigenschaften in der Quantenphysik bewusst ist, scheinen tendenziell auch ein Bewusstsein für die Bedeutung des Messprozesses zu besitzen. Die Effektstärke liegt bei $\phi = 0.42$, sodass von einem mittleren Zusammenhang ausgegangen werden kann [42].

Clusteranalytisch konnten mit den bereits mehrfach beschriebenen Verfahren vier inhaltlich interpretierbare Cluster extrahiert werden. Mit diesen können die Typen von Schülervorstellungen zur Eigenschaft Ort zusammengefasst werden. Die Clustereinteilung entnimmt man nachfolgender Tabelle:

11.5. VORSTELLUNGEN ZUR EIGENSCHAFT ORT IN DER QUANTENPHYSIK

| ProbandIn | Geschl | permLokal | BahnPh | BestSchw | Heisenberg | Dualismus | Präparation | OrtsmesQZ | Cluster |
|---------------|--------|-----------|--------|----------|------------|-----------|-------------|-----------|---------|
| 1 | m | x | | | | | x | x | 1 |
| 2 | m | | x | | | | x | | 2 |
| 3 | m | x | | | | | x | x | 1 |
| 4 | w | | x | x | | | | | 3 |
| 5 | m | | x | | | | | | 3 |
| 6 | w | | x | | | | x | x | 2 |
| 7 | m | x | | | | | x | | 4 |
| 8 | w | | x | x | x | x | | | 3 |
| 9 | w | | x | | | | x | x | 2 |
| 10 | m | x | | | | | x | | 4 |
| 11 | m | x | | | | | x | | 4 |
| 12 | w | | | | | x | x | | 4 |
| 13 | w | x | | | | x | x | | 4 |
| 14 | w | | x | | | | | | 3 |
| 15 | m | | x | | | | | | 3 |
| 16 | m | | x | | | | | | 3 |
| 17 | w | x | | | | | x | | 4 |
| 18 | m | x | | | | x | x | x | 1 |
| 19 | w | x | | | | | x | x | 1 |
| 20 | m | x | | | | | x | x | 1 |
| 21 | w | | x | | | | x | | 2 |
| 22 | m | | x | | | | x | | 2 |
| 23 | m | | | | x | | x | | 2 |
| 24 | m | | x | | | | x | x | 2 |
| 25 | m | | | | | | x | x | 2 |
| Anzahl | | 10 | 12 | 2 | 2 | 4 | 19 | 9 | |
| in % | | 40% | 48% | 8% | 8% | 16% | 76% | 36% | |

Abbildung 11.11: Ergebnisse der Kodierung aller Schülerantworten und Clustereinteilung in der Übersicht. Die Zeilen der Befragten, die dem gleichen Cluster zugeordnet werden, sind mit der gleichen Farbe eingefärbt.

Die nachfolgende Tabelle zeigt, wie viel Prozent der Befragten innerhalb der vier Cluster Aussagen machten, die den jeweiligen Kategorien zugeordnet werden können. Zusammenfassung der drei Cluster zu den Vorstellungen über Photonen. Dargestellt ist jeweils die Zahl der Lernenden pro Cluster (# SuS), sowie der prozentuale Anteil (gerundet) der Befragten innerhalb des Clusters, die bei ihren Antworten solche Äußerungen machten, die den jeweiligen Kategorien zugeordnet werden konnten.

| Cluster | # SuS | perm Lokal | Bahn Ph | Best Schw | Heisenberg | Dualismus | Präparation | OrtsmeQZ |
|---------|-------|------------|---------|-----------|------------|-----------|-------------|----------|
| 1 | 5 | 100% | 0% | 0% | 0% | 20% | 100% | 100% |
| 2 | 8 | 0% | 75% | 0% | 13% | 0% | 100% | 50% |
| 3 | 6 | 0% | 100% | 33% | 17% | 17% | 0% | 0% |
| 4 | 6 | 83% | 0% | 0% | 0% | 33% | 100% | 0% |

Tabelle 11.4: Zusammenfassung der drei Cluster zu den Vorstellungen über die Eigenschaft Ort in der Quantenphysik. Dargestellt ist jeweils die Zahl der Lernenden pro Cluster (# SuS), sowie der prozentuale Anteil (gerundet) der Befragten innerhalb des Clusters, die bei ihren Antworten solche Äußerungen machten, die den jeweiligen Kategorien zugeordnet werden konnten.

Die vier Cluster können inhaltlich wie folgt interpretiert werden:

- C1: Elaborierter Eigenschaftsbegriff.** Schülerinnen und Schüler dieses Clusters besitzen eine sehr elaborierte Vorstellung zum Eigenschaftsbegriff in der Quantenphysik. Alle Befragten dieses Clusters lehnen erstens eine permanente Lokalisierung von Quantenobjekten ab. Zweitens betonen sie die Präparation von Eigenschaften in der Quantenphysik im Allgemeinen sowie die Identifikation der Koinzidenzmessung mit einer Ortsmessung im Speziellen - und drittens weisen sie darauf hin, dass jede Messung den Quantenzustand verändert. Dabei tauchen keinerlei Äußerungen auf, die für indifferente Vorstellungen sprechen. In diesem Cluster werden immerhin 5 der Probanden zusammengefasst, was einem Anteil von 20% der Befragten entspricht. Eines der zehn Mädchen äußerte solche Vorstellungen, aber sogar knapp 27% aller Jungen (4 von 10).
- C2: Indifferenter Eigenschaftsbegriff.** Auch den Lernenden, die diesem Cluster zugeordnet sind, ist die Präparation von Eigenschaften in der Quantenphysik bewusst (100%), immerhin die Hälfte geht auch auf den Messprozess konkret ein. Allerdings gibt es auch Äußerungen, die für indifferente Vorstellungen sprechen: Drei Viertel der Befragten dieses Clusters nutzen nämlich Trajektorien von Quantenobjekten mehr oder weniger explizit, um quantenphysikalische Phänomene oder Experimente zu beschreiben. In diesem Cluster werden 8 der Probanden zusammengefasst, was einem Anteil von 32% aller Befragten entspricht. 30% (3 von 10) der Mädchen haben solche Vorstellungen und ein Drittel aller Jungen (5 von 10).
- C3: Naiver Eigenschaftsbegriff.** Bei den Befragten in diesem Cluster scheint ein Konzeptwechsel im Bezug auf den Eigenschaftsbegriff nicht erfolgreich gewesen zu sein. Hier zeigt sich deutlich, dass mechanistische Denkweise hartnäckig sind, denn alle 6 Befragten dieses Clusters nutzen Trajektorien von Quantenobjekten mehr oder weniger explizit, um quantenphysikalische Phänomene oder Experimente zu beschreiben oder behaupten, dass eine permanente Lokalisierung von Quantenobjekten daran scheitert, dass eine Ortsbestimmung schwierig ist (33%). Aspekte der Präparation oder der Änderung des Zustands durch Messung werden von keinem Lernenden angesprochen. 30% aller Mädchen (3 von 10) und 20% aller Jungen (3 von 15) gehören diesem Cluster an.
- C4: Quantenobjekte als Wellen nicht lokalisiert.** Schülerinnen und Schüler dieses Clusters unterscheiden sich nicht sehr deutlich von denen aus C1. Es ist aber eine Verschiebung zu beobachten: Während 83% (5 von 6) der Lernenden dieses Clusters eine permanente Lokalisierung von Quantenobjekten ablehnen, betonen immerhin 33% (2 von 6) der Lernenden dieses Clusters dualistische Gedanken. Die Präparation von Eigenschaften in der Quantenphysik wird aber ebenfalls von allen Befragten erwähnt. Anders als die Probanden aus C1 spricht keiner der Befragten dieses Clusters über die Zustandsänderung bei Messung. Deswegen scheint eine inhaltliche Abgrenzung gegen die Schüler mit elaborierten Vorstellungen zum Eigenschaftsbegriff klar begründet. In diesem Cluster werden immerhin 6 der Probanden zusammengefasst, was einem Anteil von 24% der Befragten entspricht. 30% der Mädchen (3 von 10) haben solche Vorstellungen, aber nur 20% aller Jungen (3 von 15)

11.6 Verständnis zur Präparation von Quantenzuständen

Das Verständnis der Schülerinnen und Schüler für die Präparation von Quantenzuständen wurde mit den folgenden Fragen im dritten Teil der Interviews erhoben, wobei Wissen verschiedener Niveaustufen abgefragt wurde:

| Teilbereich | Fragen |
|---------------------------------|--|
| Einzelphotonendetektoren | 2. Damit man mit Photonen experimentieren kann, muss man diese zunächst erzeugen. Kannst du beschreiben, welche Geräte oder Objekte man dazu benötigt und warum? [BBO-Kristall] |
| | 3. Nach dem Erzeugen, will man sie [die Photonen] auch messen, um ihre Eigenschaften zu untersuchen. Dazu haben wir Detektoren verwendet. Kannst du mal grob beschreiben, wie diese Detektoren funktionieren? [Detektoren] |
| | 4. Begründe bitte, warum es nicht reicht, mit einem einzigen Einzelphotonendetektor zu arbeiten in den Experimenten. (mgl. Nachfrage: Was verstehst du denn unter dem Begriff „Dunkelzählrate?) [Dunkelrate] |
| Koinzidenzmessung | 5. Beschreibe mal, was du unter dem Begriff „Koinzidenz“ verstehst. [Koinzidenz] |
| | 7. Wir betrachten nun das Koinzidenzexperiment. Welche Aufgabe hat nun dabei der sog. Triggerdetektor? [Triggerdet.] |
| | 8. Welche Messgröße misst man denn in diesen Einzelphotonen-Experimenten eigentlich und welche Einheit hat diese? [Zählrate] |

Tabelle 11.5: Fragen zum Themenbereich „Präparation von Quantenzuständen“. Alle Schülerantworten wurden auf einer 3-stufigen Ordinalskala mit 0, 1 oder 2 Punkten bewertet. Detaillierte Kodierregeln entnimmt man dem Kodierleitfaden im Anhang G dieser Arbeit. In eckigen Klammern sind die Bezeichnungen der Fragen notiert, wie sie in Diagrammen verwendet werden.

Die Verteilung der Punktzahlen für die einzelnen Fragen ist im nachstehenden Diagramm im Überblick dargestellt:

11.6. VERSTÄNDNIS ZUR PRÄPARATION VON QUANTENZUSTÄNDEN

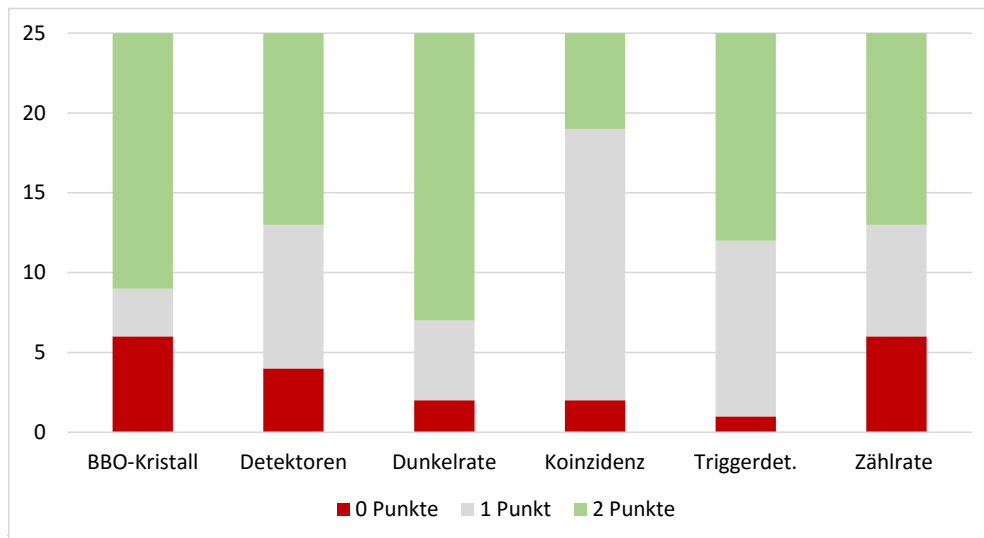


Abbildung 11.12: Punkteverteilung zu den einzelnen Fragen im Überblick.

Die mittleren erreichten Punktzahlen unterschreiten 1.16 nicht, wie die nachfolgende Tabelle zeigt.

| | BBO-Kristall | Detektoren | Dunkelrate | Koinzidenz | Triggerdet. | Zählrate |
|------|--------------|------------|------------|------------|-------------|----------|
| m | 1.40 | 1.32 | 1.64 | 1.16 | 1.48 | 1.24 |
| SD | 0.85 | 0.73 | 0.62 | 0.54 | 0.57 | 0.81 |

Tabelle 11.6: Mittelwerte und Standardabweichungen für die erreichten Punktzahlen (von max. 2) bezogen auf die einzelnen Fragen zum Themenbereich „Präparation von Quantenzuständen“.

Die mittlere Punktzahl zu der Frage nach dem Koinzidenzbegriff mag verwundern. Sie ist darin begründet, dass alle Schülerinnen und Schüler mit einem Punkt die Verallgemeinerung auf 2 oder mehr Detektoren nicht explizit geäußert haben - tendenziell haben aber auch diese Schüler den Begriff richtig nennen und klären können. Den höchsten Anteil an 0-Punkte-Ratings gibt es bei der Frage zum BBO-Kristall. Dieser liegt hier bei immerhin 24% (6 von 25).

Besonders umfassend antworteten die Schülerinnen und Schüler auf die Frage

4. Begründe bitte, warum es nicht reicht, mit einem einzigen Einzelphotonendetektor zu arbeiten in den Experimenten. (mgl. Nachfrage: Was verstehst du denn unter dem Begriff „Dunkelzählrate?“) [Dunkelrate].

Dies wird quantitativ dadurch untermauert, dass die mittlere erreichbare Punktzahl hier mit 1.64 ± 0.62 am höchsten liegt, aber es finden sich auch zahlreiche eindrucksvolle Beispiele, die diesen Eindruck stärken, z.B.:

11.7. VERSTÄNDNIS ZUR ANTIKORRELATION AM HALBDURCHLÄSSIGEN SPIEGEL

I: „Ok, alles klar. Dann machen wir gleich mal weiter. [...] Kannst du mal bitte begründen, warum es nicht reicht, in solchen Experimenten, mit einem einzigen Einzelphotonendetektor zu arbeiten.“

B13: „Ja genau man hat ja immer diese Elektronenpaare [Photonenpaare] und man braucht den einen Detektor eben als Trigger und den anderen, also wenn der andere dann gleichzeitig klickt, dann weiß man, dass es wahrscheinlich ein Photonenpaar war, weil wenn man jetzt nur einen Detektor hätte, dann wüsste man bei dem Klick nicht, ob das jetzt ein Dunkelzählereignis war oder ob das wirklich ein Photon war.“

I: „Ok, du sagst, dann weiß man, dass es wahrscheinlich ein Photon war. Warum sagst du, dass man bei diesen gleichzeitigen Klicks, dass man trotzdem nur wahrscheinlich sagen kann?“

B13: „Also, theoretisch könnte es auch passieren, dass jetzt beide gerade gleichzeitig wegen so einem Dunkelzählereignis klicken, aber das wäre halt sehr unwahrscheinlich.“

Insgesamt konnten in den sechs Fragen zu diesem Themenbereich 12 Punkte erzielt werden. Im Mittel erreichten die Lernenden 8.24 ± 1.94 Punkte, was einem prozentualen Anteil von $(69 \pm 16) \%$ entspricht.

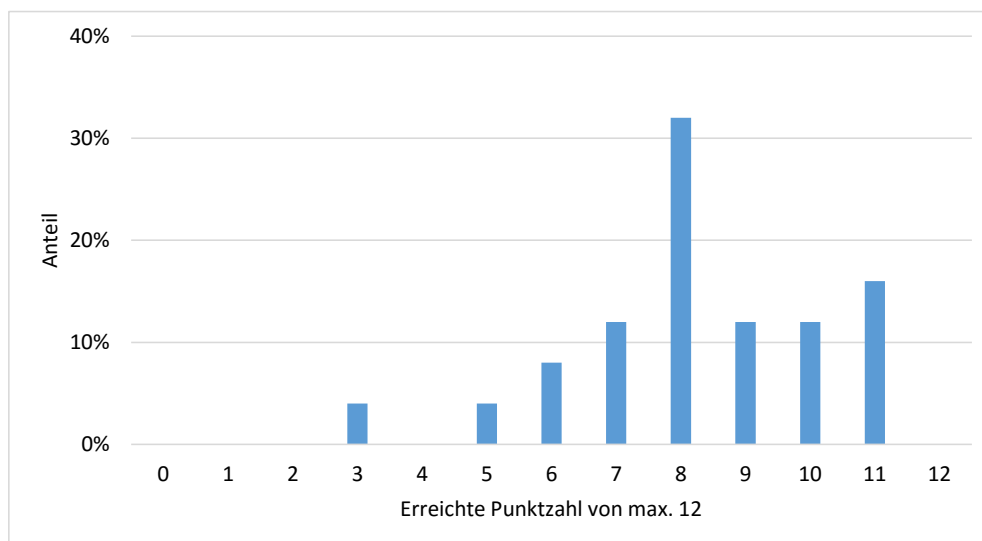


Abbildung 11.13: Punkteverteilung zu den Fragen zum Themenbereich „Präparation von Quantenzuständen“ als Ganzes..

11.7 Verständnis zur Antikorrelation am halbdurchlässigen Spiegel

Das Verständnis der Schülerinnen und Schüler für die Antikorrelation am halbdurchlässigen Spiegel wurde mit den folgenden Fragen im dritten Teil der Interviews erhoben, wobei Wissen verschiedener Niveaustufen abgefragt wurde:

9. Beschreibe einmal ein Experiment, mit dem man die Unteilbarkeit von Photonen finden kann. [Exp. Unteilbarkeit]
10. Was bedeutet der Begriff Triplekoinzidenz und warum ist diese Größe im Experiment zur Unteilbarkeit entscheidend? [Triplekoinzidenzen]
11. Erinnere dich einmal an den Faktor α . Kannst du dich erinnern, warum dieser Faktor interessant war? [Antikorrelationsfaktor]
12. Welchen Quanteneffekt hat man, wenn man $\alpha = 0$ misst? [Antikorrelation]

Alle Schülerantworten wurden auf einer 3-stufigen Ordinalskala mit 0, 1 oder 2 Punkten bewertet. Detaillierte Kodiereregeln entnimmt man dem Kodierleitfaden im Anhang G dieser Arbeit. In eckigen Klammern sind die Bezeichnungen der Fragen notiert, wie sie in Diagrammen verwendet werden.

Die Verteilung der Punktzahlen für die einzelnen Fragen ist im nachstehenden Diagramm im Überblick dargestellt:

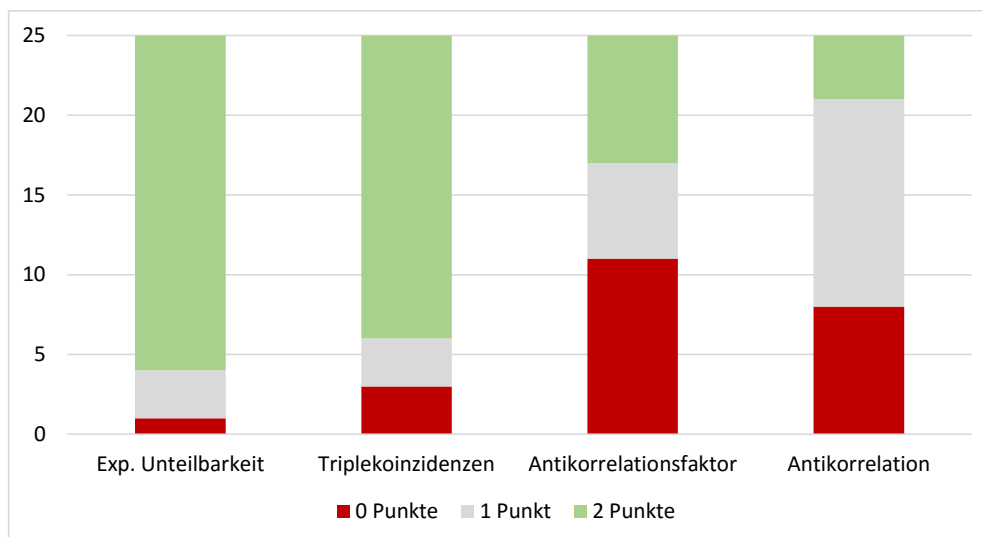


Abbildung 11.14: Punkteverteilung zu den einzelnen Fragen im Überblick.

Die mittleren erreichten Punktzahlen sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

| | Exp. Unteilbarkeit | Triplekoinzidenzen | Antikorrelationsfaktor | Antikorrelation |
|-----------|--------------------|--------------------|------------------------|-----------------|
| <i>m</i> | 1.80 | 1.64 | 0.88 | 0.84 |
| <i>SD</i> | 0.49 | 0.69 | 0.86 | 0.67 |

Tabelle 11.7: Mittelwerte und Standardabweichungen für die erreichten Punktzahlen (von max. 2) bezogen auf die einzelnen Fragen zum Themenbereich „Antikorrelation am halbdurchlässigen Spiegel“.

11.7. VERSTÄNDNIS ZUR ANTIKORRELATION AM HALBDURCHLÄSSIGEN SPIEGEL

Die mittleren Punktzahlen zu den Fragen nach einem Experiment, mit dem man die Unteilbarkeit von Photonen bestätigen kann, sowie nach der Bedeutung der Triplekoinzidenzen in diesem Experiment liegen beide deutlich oberhalb von 1.5. Die Schülerinnen und Schüler können dieses Experiment größtenteils umfassend beschreiben, z.B. so:

I: „Okay. Wir lassen das mal so stehen. Beschreibe doch mal bitte ein Experiment grob, nicht en Detail, mit dem man die Unteilbarkeit von Photonen finden kann.“

B25: „Ja. Wenn man jetzt in diesem, dieses, diesem Aufbau den wir schon hatten, mit den zwei Detektoren eben, vor den einen Detektor noch diesen Strahlteilerwürfel eben einfügen und ich weiß ja nicht, ich sag es jetzt einfach mal, mit rechts und links den rechten Strahl habe, kommt ein Detektor und beim linken Strahl wird noch ein Elektron, ein Teilwürfel eben angefügt. [I: „Strahlenteiler“] Der Strahlenteilerwürfel einfügt und dann eben dass ich drei Detektoren quasi habe. Dann ich sehen dass wenn jetzt der, wenn jetzt ein Photon kommt, dann geht das ja auf der einen Seite direkt in den Detektor und auf der anderen Seite geht es erst in den Strahlteilerwürfel und dann in einen der beiden Detektoren. Und dadurch kann man eben sehen, dass also der, wie soll ich das sagen, ich würde mal sagen, wie soll ich das erklären. Dadurch gibt es halt eben dann drei Möglichkeiten was passieren kann, also entweder es wird, ich nenne es also mal Bob und die anderen nenne ich R und T, hatten wir glaube ich auch. Dass eben R und Bob auftreten kann, T und Bob und alle drei. Also abgesehen von den Dunkelzählereignissen quasi. [I: „Ja.“] Und diese Dunkelzählereignisse, also diese Ereignisse eben dass alle drei gleichzeitig klicken ist eben so gering, also im Vergleich zu den, zu den anderen zwei Ereignissen, ich glaube das waren, die anderen müssten irgendwas mit 3000 gewesen sein und das Trippelkoinzidenzereignis glaube ich, von null bis zehn. So was, also man sieht halt schon dass es so wenig ist, dass das dann eigentlich Dunkelzählereignisse sein müssen. [I: „Ja.“] Da kann man gerade sagen dass eben das Photon unteilbar ist, weil es entweder in R oder T geht.“

Deutlich fällt auf, dass die mittlere Punktzahl für die beiden weiteren Fragen, nämlich einmal zum Antikorrelationsfaktor und einmal zur Antikorrelation selbst, sogar unter 1.00 fällt. 11 der 25 Befragten konnten nicht inhaltlich adäquat auf die Frage zum Antikorrelationsfaktor antworten. Zur Wahrheit gehört aber auch: Immerhin 8 Befragte - das entspricht fast einem Drittel aller Lernenden - konnten umfassend zum Antikorrelationsfaktor sprechen und erhielten auf ihre Antwort 2 Punkte, so zum Beispiel:

I: „Das ist interessant, du hast jetzt schon den Faktor Alpha angesprochen, kannst du nochmal Zusammenfassen, ohne konkrete Bezug auf die Formel nehmen zu müssen, aber, warum dieser Faktor so interessant war, für uns in der Physik?“

B1: „Naja, der Faktor allgemein, also der Faktor kann Werte entweder größer als ein gleich eins oder kleiner als eins annehmen. Und der Faktor ist insofern entscheidend, da wenn der Faktor größer als eins ist, kann man davon ausgehen, dass man von der klassischen Physik redet oder die Phänomene, die jetzt irgendwie dabei sind mit der klassischen Physik beschreiben

kann, wenn der Faktor gleich eins ist, also wenn Trippelkoinzidenzen und Koinzidenzen an sich gleich wahrscheinlich, sozusagen, auftreten, das ist z.B. bei Laserlicht so, damit kann man dieses Licht z.B. Klassifizieren, und tritt jetzt die Trippelkoinzidenz sehr viel unwahrscheinlicher auf, dann bewegt sich eben dieser Faktor kleiner als eins und dann weiß man, man ist jetzt eben in der Quantenwelt und braucht, sozusagen, eine andere Beschreibung dafür.“

I: „Ok. Und welchen Quanteneffekt hat man, wenn man Alpha gleich null misst?“

B1: „Wenn Alpha gleich Null ist, bedeutet das eben, dass es gar keine Trippelkoinzidenzen gibt und das wäre der Idealzustand eben dafür, dass eben die Quantenobjekte, also die Unteilbarkeit der Quantenobjekte nachgewiesen wäre, sozusagen, weil dann auch jegliche Dunkelzählraten, die vielleicht irgendwie zufällig auftreten, würden bei einem Faktor, also einem Faktor von Alpha gleich Null eben rausfallen und das wäre eben, wie gesagt, der Idealzustand.“

I: „Kannst du dich noch daran erinnern, wie man diesen Effekt in der Fachwissenschaft nennt? Wie man dieses Licht am Strahlteiler bezeichnet?“

B1: „Also ich erinnere mich an den Begriff Korreliert bzw. antikorreliert.“

I: „Genau und wie ist das Licht am Strahlteiler im Fall von Alpha gleich Null? Korreliert oder antikorreliert? Und warum?“

B1: „Da wäre das Licht antikorreliert.“ [I: „Genau und warum? Kurzer Nebensatz noch.“] „Da eben die Koinzidenz sehr viel größer ist als die Trippelkoinzidenz.“

Eine alternative - etwas knappere, aber nicht weniger richtige - Antwort wäre etwa:

I: „Ok. Erinnere dich bitte mal an den Faktor Alpha, kannst du da sagen, warum der grundsätzlich interessant ist, oder war?“

B17: „Der Faktor Alpha kann Quantenlicht eben von klassischem Licht unterscheiden, aufgrund von der Statistik.“

I: „Ja, genau. Und welchen Quanteneffekt hat man jetzt wenn man Alpha gleich null misst?“

B17: „Eben die Unteilbarkeit von Photonen wird dadurch gezeigt. Und das zeigt damit eben auch eine Antikorrelation.“

I: „Genau.“



Der Leser mag geneigt sein zu denken, dass wohl nur besonders interessierte Lernende zu solchen Antworten in der Lage sind. In der Tat zeigt sich: Alle 8 Schülerinnen und Schüler, die die Frage nach dem Antikorrelationsfaktor richtig und zusammenhängend beantworten konnten, waren auch in den anderen Fragen dieses Themenbereichs gut. Von den insgesamt 8 erreichbaren Punkten in den vier Fragen, erreichte keiner weniger als 75% der Punkte.

Insgesamt konnten in den vier Fragen zu diesem Themenbereich also, wie bereits erwähnt, 8 Punkte erzielt werden. Im Mittel erreichten die Lernenden 5.16 ± 1.76 Punkte, was einem prozentualen Anteil von $(65 \pm 22)\%$ entspricht.

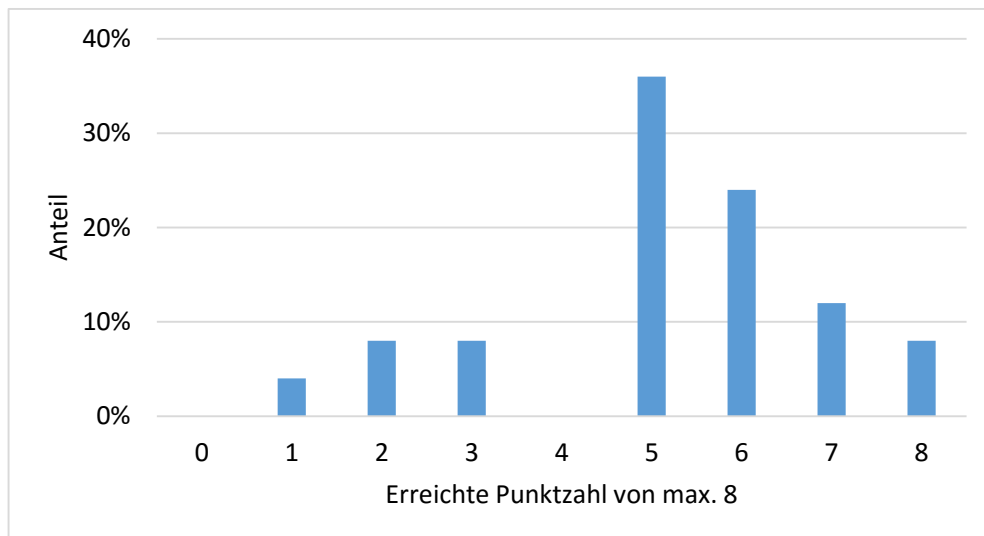


Abbildung 11.15: Punkteverteilung zu den Fragen zum Themenbereich „Präparation von Quantenzuständen“ als Ganzes..

11.8 Zusammenfassung

Der Auswertung der leitfadengestützten Interviews lagen fünf Forschungsfragen zugrunde (vgl. Kapitel 4). Die Ergebnisse der Interviewstudie tragen zur Beurteilung des Erlanger Unterrichtskonzepts bei, aber sie ermöglichen mehr. Mit Hilfe dieser Interviewstudie konnten wir erste Erkenntnisse darüber gewinnen, welchen Einfluss auf die mentalen Modelle Lernender eine experiment-orientierte Einführung in die Quantenphysik mittels quantenoptischer Konzepte besitzen kann. In diesem Kapitel wollen wir die Ergebnisse der Interviewstudie mit Bezug auf die zugrunde liegenden Forschungsfragen zusammenfassen. Im nächsten Abschnitt werden diese Ergebnisse in bestehende Schülervorstellungsforschung zur Quantenphysik eingebettet. Im nächsten Kapitel nutzen wir Ergebnisse aus den Kapiteln 10, 11 und 12 in der Triangulation, um dann konkret Bezug auf die Intervention als Ganzes zu nehmen.

11.8.1 Forschungsfrage ff1

Die erste Forschungsfrage zur Interviewstudie war folgende:

ff 1: Was macht für die Schülerinnen und Schüler die Quantenwelt aus?

Mittels Clusteranalysen der Daten konnten drei unterschiedliche Typen von Vorstellungen extrahiert werden, die bei Lernenden vorliegen, die mit Hilfe des Erlanger Unterrichtskonzepts in die Quantenphysik eingeführt wurden. Die drei Cluster können inhaltlich wie folgt interpretiert werden:

C1: Primär elaborierte Vorstellung: 44% aller Befragten, 60% aller Mädchen, 33% aller Jungen. Schülerinnen und Schüler dieses Clusters charakterisieren die Quantenphysik über nicht (semi-)klassisch erklärable Effekte, wie die Antikorrelation.

Eine Verbildlichung von Objekten der Quantenphysik im klassischen Sinn wird überwiegend abgelehnt.

C2: Quantenwelt als Welt der Technik: 16% aller Befragten, 20% aller Mädchen, 13% aller Jungen. Schülerinnen und Schüler dieses Clusters charakterisieren die Quantenphysik hauptsächlich über ihre Bedeutung für Forschung und Technik.

C3: Quantenwelt als klassische Welt auf kleiner Skala mit Abstrichen: 40% aller Befragten, 20% aller Mädchen, 53% aller Jungen. Schülerinnen und Schüler dieses Clusters charakterisieren die Quantenphysik als die Physik auf kleinen Größenskalen.

11.8.2 Forschungsfrage ff2

ff 2: Gelingen die Schülerinnen und Schüler zu einem Verständnis des Wesenszugs „Statistisches Verhalten“ der Quantenphysik?

- 84% der Befragten äußerten sich explizit dazu, dass statistische Aussagen in der Quantenphysik nur über das Verhalten von Ensembles von Quantenobjekten getroffen werden können. Lernende, denen bewusst ist, dass statistische Aussagen nicht Einzelereignisse, sondern eine Menge von Messungen betreffen, scheinen damit auch an absoluten Zufall im Kontext der Quantenphysik zu denken ($\chi^2(1) = 9.44, p < 0.01, \phi = 0.70$).
- Sieben der 25 Befragten sprechen über Wahrscheinlichkeiten und Zufall im Kontext von Ortsangaben, also zum Beispiel um Aufenthalts- oder Auftreffwahrscheinlichkeiten zu beschreiben.
- Nur 12% der Schülerinnen und Schüler äußerten Unzufriedenheit mit der Wahrscheinlichkeitsinterpretation. Sie ließen in ihren Ausführungen Zweifel anklingen, ob es nicht doch Informationen geben könnte, mit denen die Notwendigkeit der statistischen Beschreibung quantenphysikalischer Phänomene aufgelöst werden könnte.
- Alle bis auf drei Befragte konnten ein Experiment beschreiben, in dem es auf das statistische Verhalten von Quantenobjekten ankommt. Die Schülerinnen und Schüler erreichten im Mittel 1.36 ± 0.71 von 2 möglichen Punkten.

Mittels Clusteranalysen der Daten konnten drei unterschiedliche Typen von Vorstellungen extrahiert werden, die bei Lernenden vorliegen, die mit Hilfe des Erlanger Unterrichtskonzepts in die Quantenphysik eingeführt wurden. Die drei Cluster können inhaltlich wie folgt interpretiert werden:

C1: Statistische Ensemblesicht: 24% aller Befragten, 20% aller Mädchen, 27% aller Jungen. Schülerinnen und Schüler dieses Clusters treffen statistische Aussagen in der Quantenphysik nur mit Bezug auf Ensembles von Quantenobjekten. Es wird im Besonderen die Abkehr vom Determinismus in der klassischen Physik betont.

C2: Stat. Ensemblesicht mit Einschränkungen: 52% aller Befragten, 70% aller Mädchen, 40% aller Jungen. Auch Schülerinnen und Schüler dieses Clusters treffen statistische Aussagen in der Quantenphysik nur mit Bezug auf Ensembles von Quantenobjekten. Allerdings sind mitunter Vorstellungen im Sinne verborgener Parameter feststellbar.

C3: Wahrscheinlichkeiten im Kontext von Lokalisierung: 24% aller Befragten, 10% aller Mädchen, 33% aller Jungen. Schülerinnen und Schüler dieses Clusters nutzen statistische Aussagen in der Quantenphysik hauptsächlich zur Angabe von Aufenthalts- oder Auftreffwahrscheinlichkeiten.



Ein bemerkenswerter Unterschied zwischen den Lernenden aus C1 und C3 ist der, dass sie für ihre Erklärungen tendenziell unterschiedliche Ankerphänomene nutzen. Während die Schülerinnen und Schüler, die C1 zugeordnet werden, oft das Michelson-Interferometer nutzen, tendieren die Lernenden aus C3 zum Doppelspaltexperiment. Eine ähnliche Feststellung konnte auch in Kapitel 11.3 bereits berichtet werden. Es ist möglich, dass hier erkennbar wird, dass das Doppelspaltexperiment bei den Lernenden im größeren Umfang Trajektorienvorstellungen provoziert, als das Michelson-Interferometer. Eine detaillierte Aufklärung dieser Frage, kann mit den hier vorliegenden Daten allerdings nicht vorgenommen werden. Weitere Untersuchungen scheinen dahingehend sinnvoll.

11.8.3 Forschungsfrage ff3

ff3: Gelangen die Schülerinnen und Schüler zu einem Verständnis des Wesenszugs „Fähigkeit zur Interferenz“ der Quantenphysik?

- Nur 12% der Befragten erklären die Interferenz von Quantenobjekten im Sinne eine Selbstinterferenz.
- 44% der Schülerinnen und Schüler nutzen Argumentationen, die eng mit dem Eigenschaftsbegriff in der Quantenphysik zusammenhängen: die Interferenz einzelner Quantenobjekte hängt damit zusammen, dass Quantenobjekten keine Trajektorie im klassischen Sinne zugeordnet werden kann.
- 36% der Befragten begründen das Auftreten von Interferenz in Experimenten mit einzelnen Quantenobjekten mit Hilfe der statistischen Deutung in der Quantenphysik.
- Ein kleiner übriger Teil von 16% setzt an dieser Stelle Quantenobjekte mit Wellen gleich und folgert daraus die Notwendigkeit der Beobachtung von Interferenzphänomenen.

11.8.4 Forschungsfrage ff4

ff 4: Welche Vorstellung zum Photon entwickeln Schülerinnen und Schüler im Rahmen des Erlanger Unterrichtskonzept zur Quantenoptik?

Mittels Clusteranalysen der Daten konnten drei unterschiedliche Typen von Vorstellungen extrahiert werden, die bei Lernenden vorliegen, die mit Hilfe des Erlanger Unterrichtskonzepts in die Quantenphysik eingeführt wurden. Die drei Cluster können inhaltlich wie folgt interpretiert werden:

C1: Elaborierte Energiequantvorstellung: 36% aller Befragten, 50% aller Mädchen, 27% aller Jungen. Schülerinnen und Schüler dieses Clusters lehnen eine naive Teilchenvorstellung in großen Teilen ab und fassen das Photon rein funktional als Energiequant auf.

C2: Photon als Lichtteilchen: 36% aller Befragten, 20% aller Mädchen, 47% aller Jungen. Schülerinnen und Schüler dieses Clusters fassen das Photon überwiegend als Bestandteil des Lichts auf.

C3: Energiequant in Teilchengestalt: 28% aller Befragten, 30% aller Mädchen, 27% aller Jungen. Schülerinnen und Schüler dieses Clusters stellen sich das Photon mehrheitlich als (kugelförmige) Teilchen vor, besitzen aber ein überwiegend reflektiertes Bild.

11.8.5 Forschungsfrage ff5

ff 5a: Erreichen die Schülerinnen und Schüler ein konzeptuelles Verständnis für die Eigenschaft „Ort“ in der Quantenphysik?

- Obwohl 40% der Schülerinnen und Schüler hervorheben, dass Quantenobjekten nicht permanent die klassisch wohldefinierte Eigenschaft Ort zugewiesen werden kann, verwenden dennoch 48% der Befragten einen Bahnbegriff zur Beschreibung quantenphysikalischer Phänomene oder Experimente.
- Lernende, denen die Notwendigkeit der Präparation von Eigenschaften in der Quantenphysik bewusst ist, widersprechen tendenziell auch einer permanenten Lokalisierung von Quantenobjekten ($\chi^2(1) = 5.27, p < 0.001, \phi = 0.46$).
- Lernende, denen die Notwendigkeit der Präparation von Eigenschaften in der Quantenphysik bewusst ist, scheinen tendenziell auch ein Bewusstsein für die Bedeutung des Messprozesses zu besitzen ($\chi^2(1) = 6.38, p = 0.01, \phi = 0.42$).

Mittels Clusteranalysen der Daten konnten vier unterschiedliche Typen von Vorstellungen extrahiert werden, die bei Lernenden vorliegen, die mit Hilfe des Erlanger Unterrichtskonzepts in die Quantenphysik eingeführt wurden. Die vier Cluster können inhaltlich wie folgt interpretiert werden:

C1: Elaborierter Eigenschaftsbegriff: 20% aller Befragten, 10% aller Mädchen, 27% aller Jungen. Schülerinnen und Schüler dieses Clusters lehnen die permanente Lokalisierung von Quantenobjekten zugunsten der Präparation von Quantenzuständen ab. Sie kennen dabei die Rolle der Koinzidenzmessung.

C2: Indifferenten Eigenschaftsbegriff: 32% aller Befragten, 30% aller Mädchen, 33% aller Jungen. Schülerinnen und Schüler dieses Clusters kennen die Rolle der Koinzidenzmessung bei der Präparation von der Eigenschaft Ort in der Quantenphysik, neigen aber dennoch zur Nutzung eines Bahnbegriffs zur Erklärung von Phänomenen.

C3: Naiver Eigenschaftsbegriff: 24% aller Befragten, 30% aller Mädchen, 20% aller Jungen. Schülerinnen und Schüler dieses Clusters haben überwiegend (naive) mechanistische Vorstellungen und greifen häufig auf Trajektorienvorstellungen zur Erklärung von Phänomenen zurück.

C4: Quantenobjekte als Wellen nicht lokalisiert: 24% aller Befragten, 30% aller Mädchen, 20% aller Jungen. Schülerinnen und Schüler dieses Clusters lehnen die permanente Lokalisierung von Quantenobjekten mehrheitlich ab, greifen aber häufig auf dualistische Vorstellungen zurück.

ff 5b: Erreichen die Schülerinnen und Schüler ein konzeptuelles Verständnis für die für die Präparation von Quantenzuständen?

- Die mittleren erreichten Punktzahlen unterschreiten 1.16 von 2 möglichen Punkten bei keiner Frage.
- Den höchsten Anteil an 0–Punkte-Ratings gibt es bei der Frage zum BBO-Kristall. Dieser liegt hier bei immerhin 24%.
- Besonders umfassend antworteten die Schülerinnen und Schüler auf die Frage nach der Dunkelzählrate geantwortet. Dies wird quantitativ dadurch untermauert, dass die mittlere erreichbare Punktzahl hier mit 1.64 ± 0.62 am höchsten liegt. Die inhaltlichen Argumentationen waren hier sehr umfassend.
- Im Mittel erreichten die Lernenden 8.24 ± 1.94 Punkte, was einem prozentualen Anteil von $(69 \pm 16) \%$ entspricht.

ff 5c: Erreichen die Schülerinnen und Schüler ein konzeptuelles Verständnis für die Antikorrelation am halbdurchlässigen Spiegel?

- Die mittleren Punktzahlen zu den Fragen nach einem Experiment, mit dem man die Unteilbarkeit von Photonen bestätigen kann, sowie nach der Bedeutung der Triplekoinzidenzen in diesem Experiment liegen beide deutlich oberhalb von 1.5 (von 2).

- Die mittlere Punktzahl für die beiden zum Antikorrelationsfaktor und zur Antikorrelation liegt jeweils unter 1.00. 11 der 25 Befragten konnten nicht inhaltlich adäquat auf die Frage zum Antikorrelationsfaktor antworten.
- Immerhin ein Drittel aller Lernenden konnte umfassend zum Antikorrelationsfaktor sprechen und erhielten auf ihre Antwort 2 Punkte. Diese acht Schülerinnen und Schüler gehörten aber alle zur Spitzengruppe.
- Im Mittel erreichten die Lernenden 5.16 ± 1.76 Punkte, was einem prozentualen Anteil von $(65 \pm 22)\%$ entspricht.

11.9 Vergleich der Ergebnisse mit Literatur zu Schülervorstellungen in der Quantenphysik

In diesem Abschnitt sollen abschließend Befunde aus der Literatur vorgestellt werden und in Bezug zu den hier berichteten Ergebnissen gesetzt werden. Es ist hier bewusst „in Bezug zu“ unseren Ergebnissen zu betonen, weil ein Vergleich aus verschiedenen Gründen nicht sinnvoll sein kann, z.B.

- weil Antwortkategorien anders definiert, also nach verschiedenen Kriterien festgelegt sein können, oder
- weil die Zielgruppe eine andere war, z.B. Studierende statt Schüler, oder
- weil das Ziel der Befragung und damit die Fragen gänzlich unterschiedliche waren, indem zum Beispiel bei einer Erhebung sehr eng gefasste, auf einen Aspekt abzielende Fragen, bei einer anderen eher offene Fragen gestellt wurden, oder
- weil das Ziel der Befragung nicht die Untersuchung von Vorstellungen, sondern das Aufdecken von Hürden in Elementarisierungen gewesen sein könnte, oder
- weil manche Erhebungen im Zuge der Evaluation einer Intervention eingesetzt wurden - so wie hier -, andere aber nicht.

Man könnte diese Liste beliebig verlängern. Außerdem gelangt man schnell an eine andere Grenze: in der langen Tradition der Beforschung von Schülervorstellungen lag der Fokus häufig auf einem Konzeptwechsel von klassischer zu quantenphysikalischer Vorstellung, ohne so konkreten Bezug zu einzelnen Aspekten, wie hier geschehen.

Ein Konsens kann in der fachdidaktischen Forschung zu Schülervorstellungen zur Quantenphysik aber dennoch abgeleitet werden: immer wieder wird der Konzeptwechsel von mechanistischem zu Quantendenken als Dreischritt mit der Zwischenausprägung „Zwischendenken“ aufgefasst, wie ihn auch [207, S. 33] detailliert von [89, 90] ableitet.

Was die Ergebnisse dieser Interviewstudie andeuten: Eine solche Hierarchie scheint sich auch themen- bzw. aspektspezifisch in der Quantenphysik zu zeigen, wenn man die Ergebnisse dieser Interviewstudie aspektübergreifend vergleicht: Die drei sich ergebenden Cluster von Schülervorstellungen lassen sich immer grob wie folgt hierarchisieren:

11.9. VERGLEICH DER ERGEBNISSE MIT LITERATUR ZU SCHÜLERVORSTELLUNGEN IN DER QUANTENPHYSIK

- C1 **Quantendenken.** Schülerinnen und Schüler mit elaborierten Vorstellungen, primär quantenphysikalisch dominiert.
- C2 **Zwischendenken.** Schülerinnen und Schüler mit überwiegend quantenphysikalisch dominierten Vorstellungen, die aber mitunter Bedenken äußern oder mechanistische Aspekte in ihre Argumentationen einbeziehen.
- C3 **Mechanistisches Denken.** Schülerinnen und Schüler mit überwiegend naiven Vorstellungen, häufig ausgedrückt durch mechanistische Sprech- und Denkweisen.



Bei den Vorstellungen zum Eigenschaftsbegriff wurden hier vier Typen berichtet. Der Typ *Quantenobjekte als Wellen nicht lokalisiert* könnte aber durchaus gemeinsam mit dem Typ *Indifferenter Eigenschaftsbegriff* der hier als *Zwischendenken* bezeichneten Zwischenstufe zugeordnet werden.

Vor dem Hintergrund dieser Ausführungen soll im Folgenden auf die einzelnen Teilspekte konkret eingegangen werden.

11.9.1 Vorstellungen zur Quantenwelt

Wiesner befragte 1996 $N = 27$ Leistungskursschülerinnen und -schüler ebenfalls nach dem Quantenphysikunterricht zu Unterschieden zwischen klassischen Objekten und Quantenobjekten [220]. Es gibt zwischen den damals berichteten Ergebnissen und den Ergebnissen der hier berichteten Interviewstudie gewisse Ähnlichkeiten, aber auch Unterschiede:

- In der Befragung von Wiesner lag der wesentliche Unterschied zwischen klassischer Physik und der Quantenphysik für 26% der Befragten im Dualismus, also der Notwendigkeit von Modellbeschreibungen (zit. nach [143, S. 22]). Hier liegt der Anteil bei 24%, also in einem ähnlichen Bereich.
- 30% der von Wiesner befragten Schülerinnen und Schüler äußerten Vorstellungen im Sinne einer Skalierung, also eines kontinuierlichen Übergangs von klassischer Physik zur Quantenwelt (zit. nach [143, S. 22]). Dieser Anteil liegt hier bei 48%, wobei aber darauf hingewiesen werden muss, dass von diesen Lernenden sogar 50% betonen, dass bildliche Vorstellungen von Quantenobjekten nicht mit Gegenständen der Anschauung gleichgesetzt werden können. Wir können also in der in dieser Arbeit berichteten Studie eher von einer reflektierten Skalierungsvorstellung ausgehen. Auch in einer Untersuchung von Taber [203] wird von solchen Äußerungen berichtet.
- Fasst man Äußerungen zur Energiequantisierung, zur Heisenberg'schen Unbestimmtheitsrelation, zur fehlenden Eigenschaft „Ort“ von Quantenobjekten, sowie Effekte, die nur in der Quantenphysik auftreten, als Kategorie Quanteneffekte zusammen, so fallen in diese Kategorie 49% der Befragten von Wiesner (zit. nach [143, S. 22]) - dieser Anteil liegt mit den hier berichteten 68% in dieser Untersuchung höher.

Eine neue Kategorie in dieser Untersuchung ist die Kategorie „Technik + Forschung“, bezüglich derer hier immerhin 28% der Befragten Äußerungen machen.

11.9.2 Vorstellungen zum statistischen Verhalten

Mannila et al. fanden in einer Studie mit insgesamt $N = 29$ Studierenden, wobei acht Studierende des Lehramts waren, vier Typen von Vorstellungen von Quantenobjekten im Allgemeinen [127]. Einer der Typen war der „statistische Typ“. Lernende, die dieser Kategorie zugeordnet wurden, äußerten viele Aspekte im Bezug auf die statistische Interpretation der Quantenphysik. Insofern mag man diese Kategorie mit den Vorstellungen des Clusters 1 „Statistische Ensemblesicht“, wie wir es hier gefunden haben, assoziieren. Allerdings inkludieren Mannila et al. in ihrer Arbeit auch solche Studierende in das Cluster „statistischer Typ“, die Aussagen über Trajektorien mit einbeziehen: die statistische Deutung der Quantenphysik wird dann als Folge der Messungenauigkeiten bestimmt. Solche Vorstellungen sehen wir hier ebenfalls, allerdings werden diese hier in einem Cluster 2 separiert, das mit „Stat. Ensemblesicht mit Einschränkungen“ bezeichnet wird.

Im Rahmen der Evaluation des Münchner Unterrichtskonzepts wird in [143] ebenfalls eine Interviewstudie berichtet, in der auf die Wahrscheinlichkeitsdeutung der Quantenphysik Bezug genommen wird. Zwar wurden einige der damals verwendeten Kategorien deduktiv für diese Arbeit übernommen, aber diese wurden mitunter auf die Anforderungen der vorliegenden Studie angepasst, sodass die Ergebnisse schwer vergleichbar sind, zumal die dahinter liegenden Interventionen gänzlich unterschiedlich waren. Man sieht beim Vergleich der Ergebnisse aber, dass sich viele Ausprägungen in ähnlichem Maße zeigen, insbesondere der große Anteil an Schülerinnen und Schülern, denen die statistische Vorhersagbarkeit im Bezug auf Ensembles von Quantenobjekten bewusst ist. Müller differenzierte dazu abgrenzend noch eine Kategorie „(fast) keine Vorhersagbarkeit für Einzelergebnisse“, was beispielsweise in dieser Arbeit nicht geschah.

11.9.3 Vorstellungen zur Fähigkeit zur Interferenz einzelner Quantenobjekte

Die Interferenz einzelner Quantenobjekte wird im Kontext des Erlanger Unterrichtskonzepts am Michelson-Interferometer behandelt. Die Untersuchung zur Interferenz einzelner Quantenobjekte in einem ähnlichen Setting ist die von Marshman und Sing aus dem Jahr 2017 [128]. Sie untersuchten die konzeptuellen Schwierigkeiten bezogen auf Interferenzexperimente am Mach-Zehnder-Interferometer mit einzelnen Photonen von $N = 15$ Studierenden mit der Methode des Lauten-Denkens (vgl. Kapitel 5). Zwar erarbeiteten Sie experimentbezogene Hürden bei der Wissensvermittlung, aber auf detaillierte Vorstellungen zur Interferenz an sich und auf mögliche Erklärsmuster der Studierenden gingen die Autoren leider nicht ein. Lediglich Ableitungen der folgenden Art wurden anhand des Interviewmaterials getroffen (frei übersetzt nach [128]):

- Licht wird von Lernenden häufig als aus einer großen Anzahl einzelner Photonen zusammengesetzt gedacht
- Photonen wurden als Punktteilchen behandelt und deren Wellennatur ignoriert: Ein Photon geht einen der beiden Pfade im Interferometer oder teilt sich und nimmt beide Pfade.

11.9. VERGLEICH DER ERGEBNISSE MIT LITERATUR ZU SCHÜLERVORSTELLUNGEN IN DER QUANTENPHYSIK

- Lernende haben Probleme mit der Vorstellung von Photonen als unteilbare Quantenobjekte und behaupten mitunter, einzelne Photonen würden sich am Strahlteilerwürfel teilen und die beiden Teile würden interferieren.

Weil die Autoren keine Angaben darüber machten, wie häufig die Vorstellungen auftraten, scheint ein Vergleich zu den hier gefundenen Ergebnissen nicht sinnvoll. Inhaltlich kommen diese Vorstellungen aber - neben anderen - auch in der in dieser Arbeit berichteten Interviewstudie vor.

11.9.4 Vorstellungen zu Photonen

Nicht nur der Frage nach Vorstellungen zu Photonen alleine, aber besonders auch nach Vorstellungen zu Elektronen, wurde in verschiedenen Untersuchungen nachgegangen, z.B. [18, 68, 131, 87, 155]. Eine in vielen Untersuchungen berichtete Vorstellung von Quantenobjekten ist die der Kugel, die sich entlang einer Welle ausbreitet, beispielsweise bei [68, 131, 155]. In der hier berichteten Studie traf diese Vorstellung nur auf einen kleinen Teil der Befragten zu. Insbesondere Replikatvorstellungen - also Vorstellungen von Modellen als klein skalierte Abbilder der Realität [207, S. 33] - wurden hier so nach der Intervention nicht mehr beobachtet und wenn, dann aber im Zusammenhang mit Einschränkungen: den Schülerinnen und Schülern war dann bewusst, dass das zwar ihr Bild eines Quantenobjekts ist, aber dem keine Realität zugeschrieben werden kann.

Es bleibt zu klären, inwiefern die befragten Schülerinnen und Schüler der hier vorgestellten Untersuchung durch die Intervention implizit auch ein grundsätzlich verbessertes Modellverständnis in Physik erworben haben. Ubben stellt in seiner Arbeit eine „schwach bis mittelstarke Korrelation zwischen dem generellen Modellverständnis in Physik in Form einer Replikatvorstellung und klassisch geprägten mentalen Modellen zur Atomhülle“ fest [207, S. 40]. Ob der Übertrag auf Photonenvorstellungen möglich ist, bleibt unklar. Aufgrund des ähnlichen Kontextes, ist dies aber denkbar: denn bei Atomhüllen geht es auch um Elektronen, die genau wie Photonen Quantenobjekte sind.

11.9.5 Vorstellungen zur Eigenschaft Ort in der Quantenphysik

Mechanistisch geprägte Teilchenbilder von Quantenobjekten, wie sie häufig vorkommen (vgl. Abschnitt 1.9.4), gehen oft auch mit Trajektorienvorstellungen einher. Das Festhalten an Bahnen von Quantenobjekten fällt besonders auch im Kontext von Atommodellen auf [120, 9].

In der Arbeit von Lichtfeldt beispielsweise konnte in einem Prä-Post-Design vor und nach einer Intervention eine Abnahme der Kreisbahnvorstellung von Elektronen im Atom erreicht werden. Damals wurde aber nicht beforscht, inwiefern die Befragten eine Bahnvorstellung im Sinne einer real existierenden Trajektorie ablegten. Ubben wirft die Frage auf, ob die Lernenden nicht einfach davon ausgingen, dass eine solche Bahn zwar existiere, dem Beobachter aber ohne Weiteres schlicht nicht bekannt ist [207]. Eine Aufklärung dieser Frage mit den Ergebnissen der Studie von Lichtfeldt ist nicht möglich.

11.9. VERGLEICH DER ERGEBNISSE MIT LITERATUR ZU SCHÜLERVORSTELLUNGEN IN DER QUANTENPHYSIK

In dieser Studie haben wir etwas detailliertere Information diesbezüglich und es scheinen sich unter den hier Befragten in der Tat zwei Gruppen zu bilden, wie bereits von Ubben postuliert (vgl. Tabelle 11.4): Während die Schülerinnen und Schüler, die Cluster 1 und 4 zugeordnet sind, keinerlei Bahnbegriff in ihren Äußerungen verwenden und stattdessen zu 100% die Präparation eines Orts durch Messung betonen, beziehen sich beinahe alle Schülerinnen und Schüler der Cluster 2 und 3 mehr oder weniger korrekt auf eine Bahn - mitunter sogar auf eine schwer zu bestimmende. Hier halten sich beide Vorstellungsmuster in etwa die Waage.

11.9. VERGLEICH DER ERGEBNISSE MIT LITERATUR ZU SCHÜLERVORSTELLUNGEN IN DER QUANTENPHYSIK

KAPITEL 12

Triangulation zwischen den Erhebungsmethoden

„Mit jedem Perspektivenwechsel geht die Chance einher, im Vertrauten Neues zu entdecken.“

- Markus Mirwald

Einordnung in den Kontext der Arbeit

In den letzten Kapiteln wurde der Lernerfolg der Lernenden, die mittels des Erlanger Unterrichtskonzepts in die Quantenphysik eingeführt wurden, mit unterschiedlichen Methoden untersucht und die entsprechenden Ergebnisse hinsichtlich verschiedener Aspekte berichtet. Mit diesem Kapitel sollen nun ausgewählte Aspekte abschließend diskutiert werden und zwar unter Einbezug aller drei Erhebungsmethoden - wir schließen also den auf die Lernenden bezogenen Teil der summativen Evaluation mit einer Triangulation zwischen den Erhebungsmethoden ab. Im abschließenden dreizehnten Kapitel folgt noch die Darstellung der Perspektive der Lehrenden: Wie beurteilen Sie das Erlanger Konzept und seine Praxistauglichkeit?

In diesem Kapitel steht nun nicht mehr eine Entwicklung der Lernenden zwischen den Erhebungszeitpunkten im Zentrum des Interesses. Wir wollen den Stand der Schülerinnen und Schüler nach einer ersten Einführung in die Quantenphysik - mit dem Erlanger Unterrichtskonzept - festhalten. Deswegen werden nachfolgend nur solche Ergebnisse aus dem Test zum Begriffswissen Quantenoptik mit in die Analyse einbezogen, wie sie zum Posttestzeitpunkt erhoben wurden. Wir beziehen die Follow-Up-Test-Ergebnisse dabei nicht explizit mit ein, weil sich diese, wie in Kapitel 9 gesehen, nicht signifikant von denen im Post-Test unterscheiden.

12.1 Wissen, Verständnis und Vorstellungen zur Quantenphysik

Mit Hilfe des aus der Erhebung mit dem Vorstellungsfragebogen gewonnen Index konnten wir Eindrücke darüber gewinnen, ob die Vorstellungen der Lernenden eher klassisch oder quantenphysikalisch geprägt sind (vgl. Kapitel 4 und 10). Eine berechnete Frage ist die, ob ein Zusammenhang zwischen dem Wissen von und über Quantenphysik auf der einen Seite und den Vorstellungen der Lernenden andererseits, existiert. Für die Klärung der Frage nach einem Zusammenhang des deklarativen Wissens damit, ob Lernende eher klassisch oder eher quantenphysikalisch geprägte Vorstellungen besitzen, eignet sich die Analyse bivariater Korrelationen. Die nachfolgende Tabelle zeigt Pearsons Korrelationskoeffizienten zwischen dem **fachspezifischen Posttestergebnis** und den Indizes zum Eigenschaftsbegriff in der Quantenphysik, zur Wahrscheinlichkeitsdeutung und zum daraus resultierenden Gesamtindex, wie man sie aus der **Vorstellungsfragebogen-Erhebung** erhält:

| | Index Eigenschaftsbegriff | Index Wahrscheinlichkeits- deutung | Gesamtindex Quantenphysik |
|---|------------------------------|--|------------------------------|
| Deklaratives Wissen Quantenoptik (Posttest) | 0.32** | 0.53*** | 0.48*** |

Tabelle 12.1: Korrelationen zwischen dem deklarativen Wissen in Quantenoptik und den Vorstellungsindizes, wie sie sich aus der Erhebung mit dem Vorstellungsfragebogen ergeben.

Man sieht: alle Korrelationen sind nach [42] als mittel oder stark einzuschätzen und statistisch signifikant von Null verschieden, sodass also von einem Zusammenhang zwischen deklarativem Wissen und tendenziell quantenphysikalisch geprägten Vorstellungen ausgegangen werden kann.

Das konzeptuelle Wissen und Verständnis über und für die im Erlanger Unterrichtskonzept vermittelten quantenphysikalischen Konzepte wurden im Rahmen der **Interviewstudie** erhoben. Dazu sollten die Lernenden Experimente oder Geräte beschreiben und erklären, sie sollten Begründungen für unterschiedliche experimentelle Aufbauten angeben oder Zusammenhänge benennen. Weil korrelative Zusammenhänge desto aussagekräftiger sind, desto größer die Zahl der Probandinnen und Probanden ist, kann der Zusammenhang in diesem Fall nur schwer als eine Korrelation ausgedrückt werden - an der Interviewstudie nahmen nur $N = 25$ Probanden teil. Wir wollen aber am Beispiel zweier Probanden mit ganz unterschiedlichem deklarativem Wissen und ganz unterschiedlich ausgeprägtem Verständnis für quantenoptische Konzepte aufzeigen, dass wohl dennoch tendenzielle Zusammenhänge erkennbar sind.

Schüler A ist Fall Nr. 1 (vgl. Transkription auf der Daten-CD). A erreichte bei den

12.1. WISSEN, VERSTÄNDNIS UND VORSTELLUNGEN ZUR QUANTENPHYSIK

Fragen zum Themenbereich „Präparation von Quantenzuständen“ 92% der maximal erreichbaren Punktzahl und im Themenbereich „Antikorrelation am halbdurchlässigen Spiegel“ sogar 100%. Im Test zum deklarativen Wissen schnitt er oder sie zum Postzeitpunkt mit 12 erreichten Punkten (von max. 13 möglichen) ebenfalls sehr gut ab.

Schüler B ist Fall Nr. 12 (vgl. Transkription auf der Daten-CD). B erreichte bei den Fragen zum Themenbereich „Präparation von Quantenzuständen“ 58% der maximal erreichbaren Punktzahl und im Themenbereich „Antikorrelation am halbdurchlässigen Spiegel“ nur 38%. Im Test zum deklarativen Wissen schnitt er oder sie zum Postzeitpunkt mit 5 erreichten Punkten (von max. 13 möglichen) ebenfalls mit unter der Hälfte der möglichen Punktzahl ab.

Wir wollen kurz die jeweilige Clusterzugehörigkeit vergleichend zusammenfassen: Für diesen konkreten Fall zeigt sich, dass Schüler A insgesamt deutlich elaboriertere Vorstellungen äußert als Schüler B. Bei Schüler B dominieren mitunter mechanistische Denkweisen deutlich, was man nicht zuletzt daran erkennt, dass er sowohl bei den Vorstellungstypen zum Photon als auch zum Eigenschaftsbegriff Cluster 3 mit den naiven Vorstellungen zugeordnet wird.

| | Vorstellungen... | | | |
|------------------|--|--|---------------------------------------|--|
| | <i>...zur Quantenwelt</i> | <i>...zum statistischen Verhalten</i> | <i>...zum Photon</i> | <i>...zum Eigenschaftsbegriff</i> |
| Schüler A | C2 Quantenwelt als Welt der Technik | C1 Statistische Ensemblesicht | C1 Elaborierte Energiequantvorst. | C1 Elaborierter Eigenschaftsbegriff |
| Schüler B | C1 Elaborierte Vorstellung | C3 Wslk. im Kontext von Lokalisierung | C3 Energiequant in Teilchengestalt | C3 Naiver Eigenschaftsbegriff |

Tabelle 12.2: Vorstellungen von Schüler A und B im Vergleich als Fallbeispiele hohen und niedrigen Verständnisses.

Es sei an dieser Stelle noch einmal betont: Es geht mit diesem Vergleich der beiden Fallbeispiele *nicht* darum einen Zusammenhang aufzudecken, denn dazu ist der Datensatz an der Stelle zu klein und dazu ist ein qualitatives Verfahren, wie eine Interviewstudie, auch nicht die beste Wahl. Natürlich gibt es auch einzelne Fälle, in denen Schülerinnen und Schüler im Fachwisstest oder in den Verständnisfragen im Interview schlecht abschneiden, aber tendenziell gute Vorstellungen äußern und umgekehrt.

12.2 Vorstellungen zur Eigenschaft Ort und zur Wahrscheinlichkeitsdeutung

12.2.1 Eigenschaft Ort

Vorstellungen zur permanenten Lokalisierung von Quantenobjekten sind bekanntermaßen hartnäckig: viele Untersuchungen deuten darauf hin, dass eine Ablehnung einer Trajektorienvorstellung nicht häufig bei Lernenden beobachtet wird, auch nicht nach einem planmäßigen Unterricht zur Quantenphysik [120, 127, 18, 68]. In der summativen Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts konnte man das auch beobachten. Wir wollen in diesem Kapitel dennoch zeigen, dass es gelungen ist, dass ein großer Anteil der Lernenden angemessene Vorstellungen elaboriert hat.

Betrachten wir dazu zunächst den **Test zum Begriffswissen Quantenoptik**. Item 10 lautet:

Item 10. Wenn man die Einzelphotoneninterferenz im Michelson-Interferometer sieht, so muss sich das Photon im Interferometer am Strahlteiler aufgeteilt haben.

- a) Falsch, denn man sieht mit einzelnen Photonen keine Interferenzerscheinungen.
 - b) Wahr, denn Licht wird am Strahlteiler auch in zwei Teilstrahlen aufgeteilt.
 - c) Falsch, denn die Vorstellung des Photons als lokalisierbares Teilchen ist ungültig.
-

In diesem Item wird eine exakte Lokalisierung konkret abgelehnt und zwar in Antwortmöglichkeit c). Diese Antwortmöglichkeit wählen im Posttest 64% aus, im Prätest nur 8% und zwar für den Fall, dass man nur solche Items als „richtig“ kodiert, bei denen die Lernenden die richtige Antwort angekreuzt haben und mindestens sicher waren. Filtert man nur die richtigen Lösungen heraus, bei denen die Befragten angeben geraten zu haben und wertet aber alle anderen, so erhöht sich der Anteil richtiger Lösungen im Posttest sogar auf 77%. Man kann also davon ausgehen, dass der großen Mehrheit der Lernenden mindestens bewusst geworden ist, dass das Konzept der permanenten Lokalisierung von Quantenobjekten zu hinterfragen ist.

Dieses Bewusstsein wirkt sich aber nicht in diesem Umfang auf die Vorstellungen der Lernenden aus. Betrachtet man das obige Ergebnis vor dem Hintergrund der Ergebnisse aus dem **Vorstellungsfragebogen**, so zeigt sich, dass einige Schülerinnen und Schüler nicht von dem Glauben ablassen können, dass die Photonen einen Weg „gehen“. Dazu sei noch einmal an das Itempaar Eig_5 und Eig_6 erinnert (vgl. Abbildung 10.6): Zwar stimmen 77% der Schülerinnen und Schüler der Aussage

Eig_5: Die augenblickliche Position eines Photons zwischen Quelle und Detektor ist prinzipiell unbestimmt,

zu, während diese von nur 9% abgelehnt wird.

Allerdings wird die Aussage

Eig_6: Die augenblickliche Position eines Photons zwischen Quelle und Detektor ist nicht prinzipiell unbestimmt, sondern dem Experimentator unbekannt

von 31% der Schülerinnen und Schüler als teilweise richtig beurteilt und 14% stimmen ihr (völlig) zu.

Aufschluss darüber, in welchen Vorstellungen konkret sich diese etwas gegensätzlichen Ergebnisse widerspiegeln, bringen die dazugehörigen Ergebnisse aus der **Interviewstudie**. Diese bestätigt den Eindruck der beiden anderen Verfahren deutlich und die Ergebnisse klären die Varianz in den Vorstellungen auf:

- 5 der 25 befragten Schülerinnen und Schüler können zu einem Cluster zusammengefasst werden, bei denen ein Konzeptwechsel - zumindest in großen Teilen - gelungen scheint. Diese fünf Schülerinnen und Schüler artikulieren keinerlei Gedanken über Trajektorien - weder im klassischen noch in einem angepassten Sinn und eine permanente Lokalisierung wird explizit abgelehnt. Stattdessen stellen sie die Präparation von Eigenschaften ins Zentrum ihrer Argumentation. Sogar die Veränderung des quantenphysikalischen Zustands durch Messung - hier die Zerstörung der Photonen bei Ortsmessung - ist bewusst. Wir haben diesen Vorstellungstypen mit *elaborierter Eigenschaftsbegriff* bezeichnet.
- Auch die 6 Schülerinnen und Schüler im vierten Cluster äußern keinerlei Gedanken über Trajektorien und auch hier sind Vorstellungen über die Bedeutung der Präparation in der Quantenphysik vorhanden. Über 80% dieser Lernenden lehnen die permanente Lokalisierung von Quantenobjekten ohne Nachfrage ab.

Wir sehen also: Bei 11 der 25 Teilnehmerinnen und Teilnehmer der Interviewstudie sind indifferente Bedenken zumindest nicht anhand der Äußerungen feststellbar. Man sieht aber auch, dass die Stichprobe in zwei Teile unterteilt wird, denn bei den anderen 14 Probanden in den Clustern 2 und 3 wird sehr deutlich auf Bahnvorstellungen rekurriert, besonders zur Beschreibung quantenphysikalischer Phänomene (vgl. Tab. 11.4).

12.2.2 Wahrscheinlichkeitsdeutung

Zwei Aspekte zur Wahrscheinlichkeitsdeutung in der Quantenphysik wurden im Erlanger Unterrichtskonzept besonders betont:

1. Statistische Vorhersagen experimenteller Ergebnisse für ein Ensemble von Quantenobjekten.
2. Zufall der Quantenphysik ist absolut, d.h. objektiv. Die Quantenwelt ist also nicht-deterministisch.

Mit dem **Vorstellungsfragebogen** konnten wir dazu folgendes finden: Ein Großteil der Schülerinnen und Schüler scheint eine Vorstellung über den statistischen Charakter der Quantenphysik gewonnen zu haben. Dies sieht man, wenn man das Antwortverhalten zur Aussage

12.2. VORSTELLUNGEN ZUR EIGENSCHAFT ORT UND ZUR WAHRSCHEINLICHKEITSDEUTUNG

W_4: Über das Verhalten einzelner Photonen im Interferometer kann ich keine Aussagen machen. Ich kann nur Aussagen über das statistische Verhalten vieler gleichartig präparierter Photonen machen.

analysiert. Es zeigt sich aber eine recht große Streuung im Antwortverhalten (vgl. Abbildung 10.3), sodass die Ergebnisse anderer Untersuchungsmethoden unbedingt für eine detailliertere Einsicht mit einzubeziehen sind (s. unten). Außerdem differenzieren die Schülerinnen und Schüler wohl deutlich zwischen dem Determinismus in der klassischen Physik und dem fehlenden Determinismus in der Quantenphysik, was man den Ergebnissen des Itempaars W_9 und W_10 im Vergleich entnimmt (vgl. Abbildung 10.2):

W_9: Bei ausreichend genauer Kenntnis der Anfangsbedingungen könnte man vorhersagen, ob ein einzelnes Photon am Strahlteiler transmittiert oder reflektiert wird.

und

W_10: Bei ausreichend genauer Kenntnis der Anfangsbedingungen könnte man vorhersagen, könnte man in der klassischen Physik das Ergebnis eines Würfelwurfs vorhersagen.

Aus der **Interviewstudie** konnte man zu der genaueren Aufklärung der Vorstellungen der Lernenden bezogen auf diese beiden Aspekte folgendes entnehmen:

1. 84% der Befragten äußerten sich explizit dazu, dass um statistische Aussagen in der Quantenphysik treffen zu können, stets Ensembles von Quantenobjekten notwendig sind. Vor diesem Hintergrund kann das weit gestreute Antwortverhalten zur oben berichteten Frage W_4 etwas entkräftigt werden.



Die Streuung bei W_4 lässt sich womöglich mit der Formulierung des Items begründen, die im Rückblick etwas unglücklich erscheint: Die Aussage besteht aus zwei Sätzen, die sprachlich anspruchsvoll sind. Im ersten Satz wird gesagt, dass über etwas keine Aussagen gemacht werden können, um im zweiten Satz zu sagen, dass unter Umständen doch Aussagen gemacht werden können. Es ist möglich, dass sprachliche Verständnisschwierigkeiten zur großen Streuung bei diesem Item beitragen.

2. Der Quantenzufall scheint tatsächlich von einem Großteil der Lernenden akzeptiert worden zu sein, denn neben dem klaren Befund aus dem Vorstellungsfragebogen konnten 84% der Befragten im Interview angemessen dazu Stellung beziehen; nur drei der Lernenden äußerten Bedenken, ob es nicht doch einen Determinismus in der Quantenphysik geben könnte.

Dass beinahe alle Lernenden ein adäquates Bild zur Wahrscheinlichkeitsdeutung gewonnen haben, wird ferner unterstrichen davon, dass die clusteranalytisch gefundenen Typen von Schülervorstellungen zwar unterschiedliche Aspekte betonen, dass bei allen aber ein Bewusstsein für Quantenzufall und statistisches Verhalten von Quantenobjekten dominiert (vgl. Tab. 11.2).

12.3 Photonen

Nach der Intervention mit dem Erlanger Konzept lösen die Lernenden im **Begriffswissenstest** die Items, die sich explizit auf das Quantenobjekt Photon beziehen (vgl. Abschnitt 9.7) im Mittel in 63% der Fälle richtig. Das Item 13 adressiert ganz konkret die Vorstellungen der Lernenden zum Photon:

Item 13. Photonen sind...

- a) ...kugelförmige Teilchen, die manchmal wellenartiges Verhalten zeigen.
 - b) ...Bestandteile des Lichts, die von einer Welle umgeben sind, die für die Interferenz verantwortlich ist.
 - c) ...Energieportionen
-

Im Posttest entscheiden sich 3.64% für Antwort a), 7.06% für Antwort b) und 86.47% für die richtige Antwort c), 76% davon waren sicher. Die Schülerinnen und Schüler wissen also nach der Intervention zum Großteil, dass dem Photon keine kugelförmige *Gestalt* zugeordnet werden kann.

Dass die Lernenden aber durchaus noch diverse Vorstellungen zum Quantenobjekt Photon besitzen, sieht man nicht zuletzt, wenn man das Item Eig_1 des **Vorstellungsfragebogens** mit in die Evaluation einbezieht: Die Aussage

Eig_1: Im Interferometer verhält sich das Photon wie ein Teilchen und wie eine Welle. Es ist keines von beiden.

wird zwar von fast der Hälfte der Befragten als (völlig) richtig bezeichnet (44.7%), aber immerhin 20% stimmen der Aussage nur teilweise zu; über 5% der Lernenden geben sogar an, dass sie (gar) nicht stimmt.

Die Ergebnisse der **Interviewstudie** zeigen nun, dass in der Tat eine Aufspaltung dieser Vorstellungen in drei Typen festgestellt werden kann (vgl. Tab. 11.3):

1. Eine Teilmenge von 7 Schülerinnen und Schüler unter den 25 Interviewten hält an einer *Teilchengestalt* des Photons fest, wobei immerhin ein Bewusstsein dafür vorliegt, dass diese Gestalt des Photons keiner physikalischen Realität entspricht.
2. Eine Teilmenge von 9 Schülerinnen und Schüler vereint einen funktionalen und einen zumindest zu Teilen auf die Gestalt bezogenen Aspekt in ihre Vorstellungen. Photonen werden als Teilchen bzw. Bestandteile des Lichts gesehen; eine naive Teilchengestalt wird zwar von 44% dieser Schülerinnen und Schüler abgelehnt, aber dualistische Vorstellungen dominieren.
3. Die übrigen 9 Lernenden zeigen durchweg elaborierte Vorstellungen und lösen sich von einer Gestalt des Photons gänzlich, um rein funktional den Aspekt der Energieportion zu betonen.

Dass 36% der Befragten einem solchen elaborierten Vorstellungstypen zugeordnet werden können, kann durchaus als Erfolg der Intervention gewertet werden. Vor allem, wenn man im Kontrast dazu noch einmal auf die zu Beginn des Abschnitts berichteten Ergebnisse von Item 13 aus dem **Begriffswissenstest** zurückkommt: Im Prätest entschieden sich nur 29% der Schülerinnen und Schüler für die richtige Antwort c) und waren dabei sicher, während sich entsprechend 71% für eine der Antworten a) und b) und damit auf sehr naive Vorstellungen über die *Gestalt* des Photons bezogen.



In der abschließenden Diskussion der Ergebnisse vor dem Hintergrund der Forschungsfragen in Kapitel 14 dieser Arbeit werden wir diesen Aspekt noch einmal aufgreifen und auf aktuelle fachdidaktische Literatur zum Modellverständnis beziehen. Es kann hier folgendes beobachtet werden: die Vorstellungen zum Photon werden maßgeblich dominiert durch zwei Säulen. Nämlich einmal Vorstellungen, die auf Aspekten der Gestalt in der Modellvorstellung des Photons beruhen, und einmal solchen, die sich auf funktionale Aspekte der Modellvorstellung Photon stützen. Ubben beschreibt dabei Typen des Modellverständnisses [207, 209], die hier wieder erkannt werden.

KAPITEL 13

Ergebnisse der Befragung von Lehrkräften

„Die meisten Theorien sterben in der Praxis.“

- Erich Limpach

Einordnung in den Kontext der Arbeit

Das Erlanger Unterrichtskonzept zur Quantenoptik soll ein praxistaugliches Angebot für Lehrende darstellen, damit Schülerinnen und Schülern zentrale Aspekte der Quantenphysik orientiert an modernen Experimenten vermittelt werden können. Damit das neue Unterrichtskonzept Einkehr in den Physikunterricht an Schulen finden kann, ist die Beurteilung des Konzepts durch Lehrkräfte entscheidend. Die Sicht der Lehrkräfte wird in diesem Kapitel beleuchtet.

13.1 Datenerhebung und Stichprobe

Zur Bewertung des Unterrichtskonzepts durch Lehrkräfte wurde ein Fragebogen eingesetzt, der sich in Teilen an dem von [34] orientiert. Er enthält gleichermaßen offene und geschlossene Fragen. Mit den offenen Fragen kann den Lehrkräften die Möglichkeit gegeben werden Stärken und Schwächen des Konzepts zu artikulieren. Mit den geschlossenen Fragen werden Aussagen zum Unterrichtskonzept bereitgestellt, die die Lehrkräfte auf einer Ratingskala (1 = stimmt gar nicht, ..., 5 = stimmt völlig) beurteilen. Inhaltlich bezogenen sich die geschlossenen Fragen auf die folgenden Aspekte [34, S. 276ff]:

1. Didaktische Einschätzung des Unterrichtskonzepts
2. Unterrichtspraktische Beurteilung der bereitgestellten Lernhefte
3. Einsatz des Konzepts im zukünftigen Unterricht

13.2. DIDAKTISCHE EINSCHÄTZUNG DES UNTERRICHTSKONZEPTS

Der Fragebogen kann in Anhang C dieser Arbeit eingesehen werden. An der Befragung nahmen $N = 10$ der zwölf in die Studie involvierten Lehrkräfte teil. Sie begleiteten die Umsetzung des Erlanger Unterrichtskonzepts durch den Autor dieser Arbeit in der eigenen Klasse durchgängig aus dem Blick des Beobachters oder der Beobachterin.

13.2 Didaktische Einschätzung des Unterrichtskonzepts

Die Schülerinnen und Schüler akzeptieren das Erlanger Unterrichtskonzept nach Ansicht der Lehrkräfte in weiten Teilen (4.30 ± 0.64), wobei sie ferner der Ansicht sind, dass zentrale quantenphysikalische Aspekte mit Hilfe der Erlanger Unterrichtskonzepts anschaulich und verständlich vermittelt werden (4.30 ± 0.64). Dies deckt sich mit den Ergebnissen zu affektiven Lernermerkmalen aus Kapitel 8 dieser Arbeit.

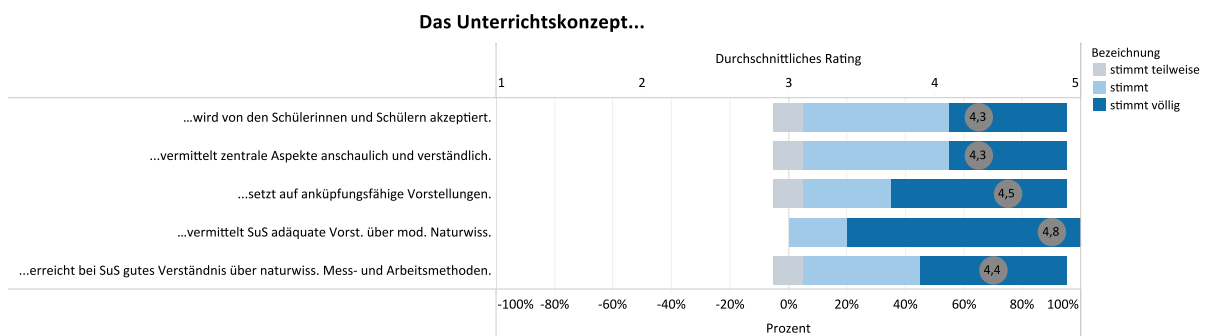


Abbildung 13.1: Diverging Stacked Bar Chart [167] zu der didaktischen Einschätzung der Lehrkräfte.

Auffällig ist die hohe Zustimmung der Lehrkräfte zu den Aussagen

„Das Unterrichtskonzept vermittelt Schülerinnen und Schülern adäquate Vorstellungen über moderne Naturwissenschaften“

und

„Das Unterrichtskonzept erreicht bei Schülerinnen und Schülern gutes Verständnis über naturwissenschaftliche Mess- und Arbeitsmethoden“,

die jeweils hohe mittlere Ratings erhalten: 4.80 ± 0.40 und 4.40 ± 0.66 . Eine Lehrkraft unterstützt diesen Befund mit einer Bemerkung zur offenen Frage nach den Stärken des Konzepts so:

„Vom konkreten, wissenschaftl. Arbeiten zu konkreten Ergebnissen, die alle nachvollziehbar sind. Hier wird universitäres Arbeiten deutlich, besser als jeder Tag der Physik [...]“

Bemerkungen dieser oder ähnlicher Art kommen häufiger vor: 60% der Lehrkräfte bezeichnen den hohen Bezug zur Forschung als eine große Stärke des Erlanger Unterrichtskonzepts, je 40% heben die Orientierung am Experiment und die Anschaulichkeit durch

13.2. DIDAKTISCHE EINSCHÄTZUNG DES UNTERRICHTSKONZEPTS

die Bildschirmexperimente als Stärken hervor. Immerhin 20% der Lehrkräfte betonen die möglichen Einblicke in wissenschaftliches Arbeiten und in wissenschaftliche Erkenntnisgewinnung (vgl. Abbildung 13.2).

Die Hauptkritikpunkte am Konzept sind nach Ansicht der Lehrenden die folgenden:

1. fehlender Lehrplanbezug: 20% der befragten Lehrkräfte äußern Bedenken, was die Einbettung des gesamten Konzepts in ihren Unterricht angeht. Eine Lehrkraft schreibt etwa

„Umfang zu groß für die zeitlichen Möglichkeiten der Q12. Nicht direkt in aktuelles Schulbuch / Lehrbuch integrierbar.“

2. Eng damit verbunden ist der zweite Hauptkritikpunkt des großen Zeitbedarfs; dieser kann nicht völlig losgelöst von Hauptkritikpunkt 1 betrachtet werden:

„Will man dieses Konzept umsetzen, so kostet dies viel Zeit. Diese steht zumeist nicht zur Verfügung aufgrund der Themenfülle.“

3. Immerhin 50% der befragten Lehrkräfte äußern Bedenken bezüglich der Herleitung des Antikorrelationsfaktors. Insbesondere scheint einigen Lehrkräften dabei der Übergang von der Betrachtung von Zählraten einerseits zu Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten gewisser Ereignisse andererseits zu fordernd. Dies sei nach der Ansicht eines Befragten *„gut geeignet für leistungsfähige Schüler“*. Eine Lehrkraft schreibt dazu beispielsweise etwas genauer:

„Math. Herleitung von α , Theorie eines Tests - zu anspruchsvoll. [...] Besser nur qualitativ erläutern!“

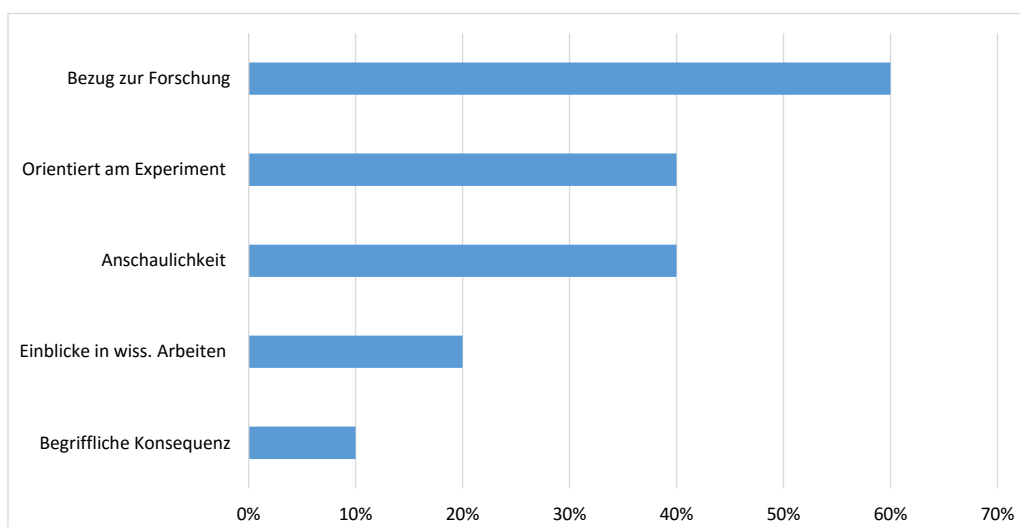


Abbildung 13.2: Von Lehrkräften genannte Stärken des Erlanger Unterrichtskonzepts in der Übersicht.

13.3 Unterrichtspraktische Beurteilung der bereitgestellten Lernhefte

Nach der Qualität der bereitgestellten Lernhefte, also der erarbeiteten Arbeitsblätter, wurde in dieser Untersuchung gefragt, weil die Delphi-Studie von Weber ergab, dass Lehrkräfte für den Unterricht der Quantenphysik besonderen Bedarf an einsetzbarem Arbeitsmaterial sehen, insbesondere an Arbeitsblättern mit Aufgaben (vgl. Kapitel 1 oder die Arbeit von Weber [214]).

Die nachstehende Abbildung fasst die Beurteilungen der Lehrkräfte zusammen: es zeigt sich, dass die zur Verfügung gestellten Arbeitsmaterialien als umfassend und qualitativ ansprechend empfunden werden. Lediglich bei der Aussage nach der ansprechenden Gestaltung gibt es ein Negativurteil. Dabei gab es die hilfreiche Anmerkung einer Lehrkraft, dass es sinnvoll sein könnte ein „*kleines Fazit am Ende jedes Arbeitsblatts*“ einzubauen, mit dem jeweils der Status innerhalb der Untersuchung einzelner Quantenobjekte festgehalten werden kann, damit die Lernenden dem roten Faden des Unterrichts noch besser folgen können: „*Was genau wurde bereits geklärt? Was ist noch zu klären?*“

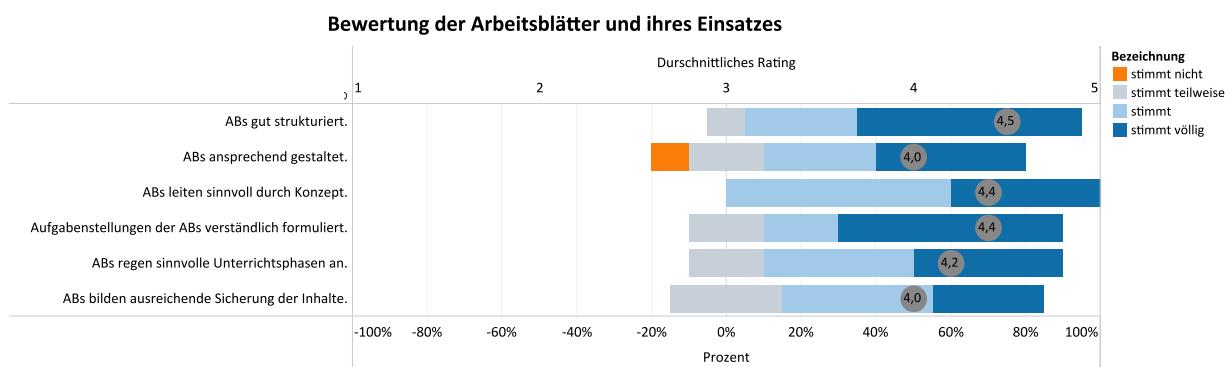


Abbildung 13.3: Diverging Stacked Bar Chart [167] zu der Beurteilung der bereitgestellten Arbeitsblätter.

13.4 Einsatz des Konzepts im zukünftigen Unterricht

Die beteiligten Lehrkräfte scheinen das Erlanger Unterrichtskonzept als einen praxistauglichen Unterrichtsvorschlag zu Quantenphysik aufzufassen, denn alle befragten Lehrkräfte bewerteten die Aussage

„Ich werde in Zukunft einen Teil des Quantenphysikunterrichts wieder mittels des Unterrichtskonzepts gestalten.“

mit stimmt oder stimmt völlig (4.40 ± 0.49). 9 von 10 Befragte geben an, das Konzept an ihre Kollegen weiterempfehlen zu wollen, denn das Konzept ermöglicht für die Quantenphysik einen „*Praxisbezug, den Schule so nicht leisten kann*“. Eine Lehrkraft gibt weiter an, in Zukunft in ihrem Unterricht im Besonderen auf die „*Betonung der Andersartigkeit von Quantenobjekten*“ einzugehen, „*die mit nichts aus unserer Lebenswelt*

13.4. EINSATZ DES KONZEPTS IM ZUKÜNFTIGEN UNTERRICHT

vergleichbar sind.“

Die Einbindung der Einzelphotonenexperimente in Realexperimenten, anstelle von interaktiver Bildschirmexperimente, scheint hingegen weniger im Zentrum des Interesses der Lehrkräfte zu stehen (3.10 ± 1.37).

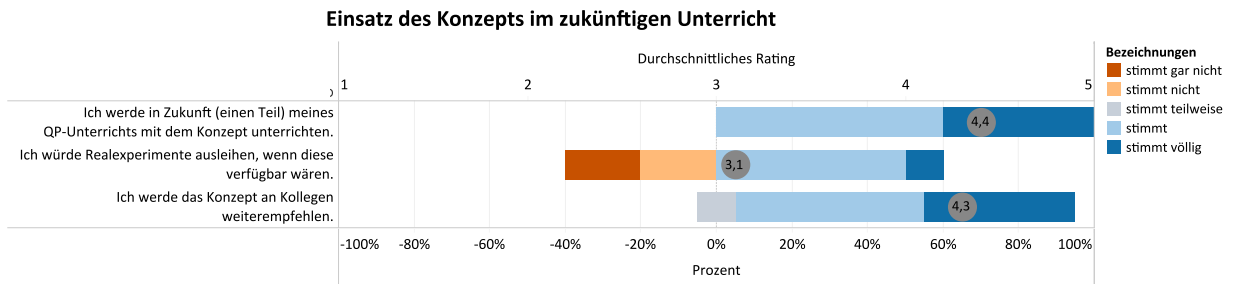


Abbildung 13.4: Diverging Stacked Bar Chart [167] zu der Beurteilung der bereitgestellten Arbeitsblätter.

13.4. EINSATZ DES KONZEPTS IM ZUKÜNFTIGEN UNTERRICHT

Teil IV

Reflexion, Diskussion & Ausblick

KAPITEL 14

Reflexion und Diskussion

„Sobald du bewertest, wird aus dem, was ist, eine Interpretation dessen, was ist.“

- Georg-Wilhelm Exler

Einordnung in den Kontext der Arbeit

Nachdem die einzelnen Studienergebnisse umfassend dargestellt und durch Triangulation miteinander in Bezug gesetzt wurden, folgt in diesem letzten Teil dieser Arbeit zunächst ein Rückbezug auf die in Kapitel 4 vorgestellten Forschungsfragen. Es werden dabei keine Hypothesen bekräftigt oder verworfen, denn es handelt sich bei der hier berichteten Studie um eine explorative Untersuchung. Stattdessen stellen wir in diesem Kapitel die einzelnen Ergebnisse zusammen, die eine Annäherung an die Klärung der Forschungsfragen ermöglichen sollen. Davor werden aber Kritik und Limitationen an der Studie skizziert, um diese bei der Diskussion der Ergebnisse präsent zu haben.

14.1 Limitationen der Studie: Kritische Betrachtungen und Anmerkungen

In diesem Abschnitt wird auf die kritischen Punkte des für dieses Projekt gewählten Studiendesigns eingegangen. Diese kritischen Aspekte klar zu benennen, ist vor dem Hintergrund der sich daran anschließenden Diskussion der Forschungsergebnisse unabdingbar:

- Die Stichprobe ist mit $N = 171$ Probandinnen und Probanden nicht sehr groß, insbesondere haben nur $N = 118$ Schülerinnen und Schüler an der Befragung mit dem Vorstellungsfragebogen teilgenommen. Obwohl größere Stichprobenumfänge die externe Validität und damit die Generalisierbarkeit erhöhen könnten, stehen

14.1. LIMITATIONEN DER STUDIE: KRITISCHE BETRACHTUNGEN UND ANMERKUNGEN

schulorganisatorische Gründe einer Ausweitung der Studie entgegen. Dabei ist zu bedenken, dass

1. die Gesamtstichprobe der Schülerinnen und Schüler, die in der 12. Jahrgangsstufe noch Physikunterricht haben deutlich kleiner ist, als etwa in der Mittelstufe und, dass
 2. die Bereitschaft zur Teilnahme an einer Studie in einem verkürzten Schuljahr vor den Abiturprüfungen seitens Schulen und Lehrkräften nicht beliebig groß ist.
- Der Autor dieser Arbeit unterrichtete die Klassen in der Intervention selbst. Dazu besuchte er die teilnehmenden Klassen in ihrem regulären Physikunterricht und im regulären Physiksaal. Die Rolle von Forscher und Versuchsteilnehmer ist kritisch zu sehen, aber zwei Gründe sprechen zentral für die hier vollzogene Realisierung:
1. Auch für die Lehrkräfte ist der begriffliche Rahmen, den das Erlanger Konzept mit sich bringt, ein völlig Neuer. Um Hemmungen gegenüber diesem neuen, an Experimenten orientierten Konzept abzubauen, muss daher erst einmal gezeigt werden: *„Lernende finden es interessant und lernen auch etwas über moderne Physik damit. Außerdem können typische Lernschwierigkeiten umgangen werden.“* Lässt man nun im Rahmen einer Evaluationsstudie Lehrkräfte unterrichten, die diese Begriffe und Konzepte nicht kennen, so führt das vielleicht im besten Fall zu einer Unterschätzung der Wirksamkeit des Konzepts, im schlechtesten Fall zum Versagen der Teilnahme an der Untersuchung.
 2. Man mag dem entgegen, man könne die Lehrkräfte ja schulen, schließlich würde das auch in anderen Studien so gemacht. In der Tat ist das eine Überlegung gewesen, die auch mit verschiedenen Lehrkräften diskutiert wurde, insbesondere vor dem Hintergrund, dass mit der Arbeit von [214] ein angemessenes Fortbildungskonzept vorliegt. Die befragten Lehrkräfte zeigten sich aber kritisch aus u.a. folgenden Gründen:
 - (a) Die Inhalte aus dem Erlanger Konzept wären ja nicht in vollständiger Deckung mit dem Lehrplan, es bringe ihnen also vermutlich nichts.
 - (b) Die Vorbereitung ihres Oberstufenkurses habe höchste Priorität. Sie ist zeitintensiv und daher würden sie ungern an zusätzlichen Schulungsmaßnahmen teilnehmen.



Auf der Grundlage der hier berichteten Ergebnisse sind in Zukunft Replikationsstudien in realen Unterrichtssituationen denkbar, in denen man mit einzelnen Lehrkräften arbeitet, die Bereitschaft zur Schulung zeigen, damit der Transfer auf die reale Unterrichtssituation ermöglicht wird. Details zu zukünftigen Forschungsmöglichkeiten werden im Ausblick in Kapitel 15 beschrieben.

Um vor diesem Hintergrund dennoch die Objektivität der Untersuchung im bestmöglichen Umfang zu gewährleisten, wurden folgende Maßnahmen ergriffen.

- *Durchführungsobjektivität*: Der Unterricht folgte einem streng vorbereiteten Artikulationsschema - auch die Umsetzung der Tests (vgl. Kapitel 2 und Anhang A).
 - Es wurden Testinstrumente im geschlossenen Format bzw. aus anderen Untersuchungen einbezogen: das entwickelte Testinstrument zum Begriffswissen beinhaltet Fragen im geschlossenen Format. Die Fragen aus dem Vorstellungsfragebogen von [143] sind ebenfalls im geschlossenen Format formuliert und zwar mit Ratingskala (vgl. Kapitel 4). Die *Auswertungsobjektivität* kann also in diesem Fall als gegeben angesehen werden.
 - Um die *Interpretationsobjektivität* zu gewährleisten, wurden Ergebnisse trianguliert (vgl. Kapitel 13), die mittels dreier unterschiedlicher Methoden gewonnen wurden. Es ließen sich Argumente mittels statistischer Daten aus allen drei Erhebungen untermauern, um Ergebnisse zu begründen.
- Die Untersuchung wurde nicht unter Einbezug einer Kontrollgruppe durchgeführt, obwohl dies zur Evaluation neuer Unterrichtsvorschläge üblich ist (vgl. Kapitel 4). Allerdings sind Kontrollgruppendesigns nur angemessen, wenn ein Vergleich zweier Verfahren sinnvoll ist. Nachdem kein Unterrichtskonzept existiert, das mit dem Erlanger Konzept vergleichbar ist, erübrigt sich die Frage nach dem Kontrollgruppendesign. Vergleicht man Leistungen, Verständnis etc. vor und nach einer Maßnahme - so wie hier - an nur einer Stichprobe, so führt die Auswertung des Materials im Falle statistisch signifikanter Veränderungen, nur zu einem schwachen Beleg für die Wirkung der entsprechenden Maßnahme, weil der Einfluss anderer Ursachen nicht ausgeschlossen werden kann [50, S. 560f]. Dies stimmt selbstverständlich auch für diese Studie, aber:
1. Die Lernenden haben mit dieser Intervention - also dem Erlanger Unterrichtskonzept zur Quantenoptik - ihre *ersten* Erfahrungen mit Quantenphysik gemacht. Quantenphysik steht im Lehrplan der 12. Jahrgangsstufe verankert (Bayern) und nur in der Jahrgangsstufe 9 wird das Konzept Photon im Kontext atomarer Energieübergänge thematisiert. Dass die Schülerinnen und Schüler keinerlei Vorwissen haben, zeigen insbesondere die Prätestergebnisse (für Details dazu vgl. Kapitel 9): im Prätest wurden im Mittel nur 14% der dreizehn Items richtig gelöst, im Durchschnitt also weniger als zwei Items. Dabei entfallen die meisten im Mittel erreichten Punkte auf Item 7, in dem danach gefragt wird, was Interferenz ist, was also kein Thema der Quantenphysik ist. 47% der Befragten lösen dieses Item bereits im Prätest richtig. Ohne dieses Item liegt der Anteil richtig gelöster Items nur bei knapp über 10%.
 2. Der Lernzuwachs wird nicht durch unterschiedliche Lehrkräfte in den Klassen beeinflusst. Der Autor unterrichtet das Konzept selbst. Dadurch kann davon ausgegangen werden, dass der Unterricht in allen Klassen gleich abgelaufen ist, denn er war an ein vor der Intervention erarbeitetes Artikulationsschema (vgl. Anhang A) angepasst.
 3. Eine Verallgemeinerung der Ergebnisse aus der Studie war *nicht* Ziel und Anspruch dieser Arbeit. Ziel war es zu zeigen: Schülerinnen und Schüler der gymnasialen Oberstufe verstehen quantenoptische Aspekte, lernen diese mit

Hilfe der Elementarisierungen des Erlanger Konzepts erfolgreich und gelangen zu einem Verständnis der Wesenszüge. Man mag im Mittel den Lernzuwachs mit dieser Studie überschätzen. Aber es zeigt sich deutlich: es geht.



Auf der Grundlage der hier berichteten Ergebnisse sind Vergleichsuntersuchungen in Zukunft - mindestens bezogen auf ausgewählte Aspekte - denkbar und wohl auch sinnvoll, dazu mehr im Kapitel 15.

- Eine Rasch-Skalierung des Fachwissenstests zur Quantenoptik, der in dieser Studie zur Erhebung des deklarativen Wissens genutzt wurde, könnte einen Mehrwert bedeuten. Bei [50, S. 212] kann allerdings nachgelesen werden, dass die Ergebnisse von klassisch und probabilistisch konstruierten Tests häufig gut übereinstimmen.
- Es ist mit den erhobenen Daten nicht möglich aufzuklären, zu welchen Teilen die verschiedenen Aspekte der Intervention - also z.B. die gewählte Sachstruktur oder die bereitgestellten Unterrichtsmaterialien, wie Arbeitsblätter und Bildschirmexperimente - zum erzielten Lernzuwachs beitragen.

14.2 Diskussion

Wir wollen in diesem Abschnitt die Ergebnisse der summativen Evaluation zusammenfassend nutzen, um eine Annäherung an die Klärung der in Kapitel 4 dargelegten Forschungsfragen zu realisieren.

14.2.1 Deklaratives Wissen zur Quantenoptik

Die Forschungsfrage 1 lautete:

FF 1: Erreichen die Lernenden durch das Unterrichtskonzept ein umfassendes Begriffswissen zur Quantenoptik?

FF 1a: Führt das Unterrichtskonzept zu einem angemessenen und sicheren deklarativen Wissen zur Quantenoptik?

FF 1b: Sind die Schülerinnen und Schüler in der Lage mit den Begriffen der Quantenoptik zu argumentieren und Zusammenhänge herzustellen?

Die Schülerinnen und Schüler, die an der Untersuchung teilnahmen, hatten keinerlei Vorkenntnisse zur Quantenphysik. Die Intervention mit dem Erlanger Unterrichtskonzept stellte ihren ersten Kontakt zur Quantenphysik dar. Im Prä-Posttestvergleich zeigte sich ein signifikanter Lernzuwachs ($r = 0.11$): im Posttest lösen die Schülerinnen und Schüler 54% der Items richtig (vgl. Kapitel 9.1). Gemäß des in Kapitel 4.1 festgelegten Cut-off-Werts (50%) wird daher von einem *angemessenen* deklarativen Wissen zur Quantenoptik der Lernenden nach der Intervention ausgegangen.

Die Lernenden selbst haben dabei im Post- und auch im Follow-Up-Test überwiegend das subjektive Empfinden, bei der Auswahl der Antwortmöglichkeiten sicher zu sein. Dies zeigt sich auch als statistisch signifikanter Mittelwertsunterschied im Vergleich zum Prätest ($r_{\text{Prä-Post}} = 0.17$, $r_{\text{Prä-FU}} = 0.12$). Gemäß des in Kapitel 4.1 festgelegten Cut-off-Werts kann folglich auch von einem *sicheren* deklarativen Wissen zur Quantenoptik der Lernenden nach der Intervention ausgegangen werden: die Antwortsicherheit im Posttest überschreitet den Wert von $2.65 < 3.00$ für kein Item. Dies wird noch gestützt durch die Beobachtung, dass der Rückgang in den mittleren Testscores zum zeitverzögerten Follow-Up-Test nicht statistisch signifikant wurde, d.h. von einem nachhaltigen Lernzuwachs ausgegangen werden kann.

Mit den Kritikpunkten an der Studie im Hinterkopf mag man diesen Lernzuwachs als überschätzt bezeichnen und in der Tat ist dieser in Zukunft mit quasi-experimentellen Studiendesigns unter realistischeren Bedingungen zu überprüfen. Aus den in dieser Studie erhobenen Daten lässt sich aber klar folgern: die Sachstruktur, die mit dem Erlanger Unterrichtskonzept bereitgestellt wird, ermöglicht Schülerinnen und Schülern der gymnasialen Oberstufe das Lernen über Quantenphysik anhand ausgewählter Konzepte der Quantenoptik und orientiert am Experiment.

Um zu überprüfen, ob die Lernenden ferner in die Lage versetzt werden, mit den Begriffen der Quantenoptik zu argumentieren und Zusammenhänge herzustellen, wurde im dritten Teil der leitfadengestützten Interviews auf Konzepte der Quantenoptik Bezug genommen. Dabei standen neben begrifflichen Klärungen vor allem die Zusammenhänge zwischen den quantenoptischen Aspekten im Zentrum. Es zeigte sich, dass die Schülerinnen und Schüler insbesondere die Inhalte des Themenbereichs *Präparation von Quantenzuständen* gut verstanden haben. Auf die Frage

4. Begründe bitte, warum es nicht reicht, mit einem einzigen Einzelphotonendetektor zu arbeiten in den Experimenten. (mgl. Nachfrage: Was verstehst du denn unter dem Begriff „Dunkelzählrate?“)

erhielten die Befragten im Mittel 1.62 ± 0.62 von 2 möglichen Punkten. Auch die Funktionsweise der Einzelphotonendetektoren konnte von der Mehrheit der befragten Schülerinnen und Schülern angemessen beschrieben werden (1.32 ± 0.73 Punkte), hier erwies sich die Schneelawinenanalogie als fruchtbar. Insgesamt erreichten die Lernenden im Mittel 8.24 ± 1.94 von 12 möglichen Punkten in diesem Themenfeld.

Ein etwas differenzierteres Bild zeigte sich beim Themenbereich *Antikorrelation am halbdurchlässigen Spiegel*. Das zugehörige Experiment - zu Einzelphotonen am Strahlteilerwürfel - konnte zwar von fast allen Befragten richtig und vollständig beschrieben werden (1.80 ± 0.49 Punkte), aber die Bedeutung des Antikorrelationsfaktors war nur etwa einem Drittel der Schülerinnen und Schüler zugänglich (0.88 ± 0.86 Punkte). Diese Schülerinnen und Schüler gehörten alle zur Spitzengruppe. Es scheint also die Herleitung des Antikorrelationsfaktors und die Klärung seiner Bedeutung, wie in der Intervention durchgeführt, für viele Schülerinnen und Schüler zu anspruchsvoll gewesen zu sein, was sich mit dem Eindruck der befragten Lehrkräfte deckte: 50% von ihnen äußerten gerade diese Bedenken. Es ist möglich, dass die nur in Teilen erfolgreiche Vermittlung des Antikor-

relationsfaktors daran geknüpft ist, dass nur begrenzt Zeit zu dessen Vermittlung zur Verfügung stand. Unterrichtspraktische Vorversuche, bei denen zum Antikorrelationsfaktor ergänzend der Artikel von Grangier et al. [69] gemeinsam mit den Lernenden gelesen werden konnte, führten zu anderen Erfahrungen. Auch in der in Kapitel 3 dieser Arbeit berichteten Akzeptanzbefragung zeigte sich beispielsweise die Akzeptanz der Lernenden. Insgesamt erreichten die Schülerinnen und Schüler im Themenfeld zur Antikorrelation 5.16 ± 1.76 von 8 möglichen Punkten.

Zusammenfassend kann davon ausgegangen werden, dass die Lernenden die quantenoptischen Konzepte in einem angemessenen Umfang verstanden haben und diese für Argumentationen überwiegend nutzen können.

14.2.2 Verständnis für Wesenszüge der Quantenphysik

Die Forschungsfrage 2 lautete:

FF 2: Inwiefern gelangen die Schülerinnen und Schüler zu einem Verständnis der Wesenszüge „Statistische Vorhersagbarkeit“ und „Fähigkeit zur Interferenz“ nach Küblbeck und Müller [22]?

Das Verständnis für die Wesenszüge „Statistische Vorhersagbarkeit“ und „Fähigkeit zur Interferenz“ wurde in der Interviewstudie erhoben. Zum statistischen Verhalten zeigte sich: 84% der Befragten ist bewusst, dass sich statistische Aussagen immer nur auf Ensembles von Quantenobjekten beziehen, nicht aber auf die Prognose des Ausgangs eines Experiments mit einem einzigen Quantenobjekt. Es scheint eine Abhängigkeit dieses Bewusstseins damit zu geben, dass Lernende eine deterministische Vorstellung der Quantenphysik fallen lassen ($\chi^2(1) = 9.44, p < 0.01$) - insgesamt differenzieren 84% sehr klar zwischen dem Zufall in der klassischen Physik und in der Quantenphysik. Dies bestätigt auch der Vergleich des Antwortverhaltens der Probandinnen und Probanden auf das Aussagenpaar

W_9: Bei ausreichend genauer Kenntnis der Anfangsbedingungen könnte man vorhersagen, ob ein einzelnes Photon am Strahlteiler transmittiert oder reflektiert wird.

und

W_10: Bei ausreichend genauer Kenntnis der Anfangsbedingungen könnte man vorhersagen, könnte man in der klassischen Physik das Ergebnis eines Würfelwurfs vorhersagen.

aus dem Vorstellungsfragebogen: Zu Aussage W_9 geben ca. 80% der Befragten an, dass diese mindestens teilweise nicht stimmt, während Aussage W_10 über 80% der Befragten mindestens teilweise zustimmen. Clusteranalytisch lassen sich nach Einführung der Lernenden in die Quantenphysik mit Hilfe des Erlanger Konzepts drei Vorstellungstypen finden: 6 der 25 befragten Schülerinnen und Schüler sind dabei dem Cluster *Statistische Ensemblesicht* zugeordnet. Dieser Vorstellungstyp entspricht einer elaborierten Sicht auf

das statistische Verhalten von Quantenobjekten - 24% der Befragten besitzen solche Vorstellungen. 13 weitere Befragte werden in einem Cluster zusammengefasst, das inhaltlich mit *Statistische Ensemblesicht mit Einschränkungen* zusammengefasst wird. Lernende dieses Clusters haben überwiegend auch adäquate Vorstellungen, wobei hier Bedenken verschiedener Art festgestellt werden können (vgl. Kapitel 11). Insgesamt scheinen die Schülerinnen und Schüler aber ein überwiegend quantenphysikalisch geprägtes Verständnis vom statistischen Verhalten der Quantenobjekte aufgebaut zu haben: mit Hilfe des Vorstellungsfragebogens wurde ein mittlerer Index von 45.79 ± 40.22 auf einer Skala von -100 (= klassisch dominierte Vorstellungen) bis +100 (= quantenphys. dominierte Vorstellungen) berechnet, was die obigen Ausführungen untermauert.

Die Interferenz einzelner Quantenobjekte wurde im Unterricht mit dem Erlanger Konzept am Beispiel einzelner Photonen im Michelson-Interferometer behandelt. Der Übertrag auf die im Unterricht nicht diskutierte Situation „einzelnes Elektron am Doppelspalt“ gelang im Fachwissenstest zum Postzeitpunkt immerhin 66% der Schülerinnen und Schüler, 42% waren dabei sogar sicher. Die Formulierung des Wesenszugs „Fähigkeit zur Interferenz“ in seiner aktuellen Fassung bereitete einigen Lernenden aber erhebliche Schwierigkeiten: 64% der Befragten war die Bedeutung des Teils „wenn es für das Versuchsergebnis mehr als eine klassisch denkbare Möglichkeit gibt“ unklar (vgl. Kapitel 11). Tatsächlich mag das darauf zurückzuführen sein, dass über klassische Aspekte während des Unterrichts im Rahmen dieser Studie gar nicht gesprochen wurde. Den Schülerinnen und Schüler wurde eine Debatte über einen Welle-Teilchen-Dualismus vorenthalten, aber dass eine naive Teilchenvorstellung von Photonen ungültig ist, wurde als Ergebnis des Interferometer-Experiments fixiert. Es kann sinnvoll sein auf Grundlage dieser Erkenntnisse für zukünftige Unterrichtsversuche eine weiterentwickelte Formulierung des Wesenszugs „Fähigkeit zur Interferenz“ zu erarbeiten.

Insgesamt zeigt sich, dass die Lernenden nur in seltenen Fällen versuchen, die Interferenz einzelner Quantenobjekte mechanistisch zu erklären, oder zu beschreiben: 12% erläutern die Interferenz als Selbstinterferenz und etwas mehr versuchen sich an einer Erklärung im Teilchenbild. Dem gegenüber stehen aber 44% der Befragten, die die Einzelphotoneninterferenz im Zusammenhang mit der fehlenden permanenten Lokalisierbarkeit nennen und 36% der Lernenden argumentieren, dass die Interferenz einzelner Quantenobjekte mit deren statistischem Verhalten zu erklären ist. Nur zwei der 25 Befragten konnten nicht eigenständig ein Experiment beschreiben, das zum Nachweis der Interferenz einzelner Quantenobjekte geeignet ist.

Zusammenfassend deuten die empirischen Ergebnisse darauf hin, dass die Schülerinnen und Schüler ein Verständnis für die beiden diskutierten Wesenszüge entwickelt haben - und das in einer Einführung in die Quantenphysik, die gerade einmal vier Schulstunden dauerte. Über längerfristige Effekte über das deklarative Wissen hinaus können hier keine Aussagen getroffen werden.

14.2.3 Vorstellungen zur Eigenschaft Ort und zur Wahrscheinlichkeitsdeutung

FF 3: Gelangen die Schülerinnen und Schüler zu quantenphysikalisch adäquaten Vorstellungen zur Eigenschaft Ort sowie zur Wahrscheinlichkeitsdeutung in der Quantenphysik?

Zur Eigenschaft Ort: Die Vorstellungen der Lernenden zur Eigenschaft Ort und zur Wahrscheinlichkeitsdeutung wurden mit allen drei Erhebungsmethoden in gewissem Umfang erhoben und die Ergebnisse wurden in Kapitel 12 dieser Arbeit bereits trianguliert. Bezogen auf die konkreten Vorstellungen erweisen sich allerdings die Ergebnisse der Interviewstudie naturgemäß als am aufschlussreichsten:

Es scheint sich beim Thema Eigenschaft „Ort“ sehr deutlich ein unterschiedliches Modellverständnis der Lernenden zu zeigen, wie es schon bei [207] jüngst im Kontext von Atommodellen festgestellt wurde. Ubben konnte zeigen, dass sich die beiden Faktoren Gestalt und Funktionalität mentaler Modelle unabhängig voneinander beschreiben lassen: „Die Gestaltstreue beschreibt, in wieweit die Gestalt der mentalen Modelle in der Atomphysik [...] als realitätsgetreu empfunden wird [...] bzw. inwieweit physikalische Modelle als gestaltgetreue Abbilder der Realität gesehen werden“ [207, S. 47]. Solche Vorstellungen liegen bei 14 der 25 in der Interviewstudie befragten Probanden vor, die mehr oder weniger deutlich auf Trajektorienvorstellungen rekurrieren und damit auf die Gestalt einer Bahn und - wie wir später noch einmal sehen werden - auf eine Gestalt der Photonen Bezug nehmen. Wir konnten die Schülerinnen und Schüler mit solchen Vorstellungen clusteranalytisch aber trennen und zwar zu zwei primären Vorstellungstypen:

- einem Typen mit indifferenten Vorstellungen zur Eigenschaft Ort in der Quantenphysik. Diesen Lernenden ist zwar bewusst, dass es die Eigenschaft Ort für Quantenobjekte als solche nicht gibt, sondern diese zu präparieren ist. Trotzdem nutzen sie einen Bahnbegriff, um Phänomene oder Experimente zu erklären (Cluster *indifferenter Eigenschaftsbegriff*, vgl. Kapitel 11.5).
- einem Typen, der an der klassischen Teilchen- und Trajektorienvorstellung erkennbar festhält (Cluster *naiver Eigenschaftsbegriff*, vgl. Kapitel 11.5).

Ubben schlägt in seiner Arbeit auf Grundlage der Gestalts- und Funktionalitätstreue vier Typen der Wahrnehmung mentaler Modelle vor. Die beiden oben beschriebenen Vorstellungstypen *indifferenter Eigenschaftsbegriff* und *naiver Eigenschaftsbegriff* lassen sich den von Ubben gefundenen Archetypen folgendermaßen zuordnen:

- Der *Architekturtyp* beschreibt, „wenn eine Person ein mentales Modell eher als gestalttreues Abbild und nicht als funktionalitätstreues Abbild versteht. Dabei wird das Modell als gestalttreues Replikat der Realität wahrgenommen. Somit verstehen diese Personen die betroffenen mentalen Modelle primär als skalierte, reale Gestalten“ [207, S. 53]. Die Schülerinnen und Schüler des Clusters *naiver Eigenschaftsbegriff* lassen sich also wohl am ehesten mit dem Architekturtyp assoziieren, wobei auch eine Zuordnung zum dualen Typ denkbar ist.

- Der *duale Typ* ist der, bei dem „ein mentales Modell als Repräsentant sowohl für Gestalt als auch Funktionalität verstanden wird“ [207, S. 54]. Die Schülerinnen und Schüler des Clusters *indifferenter Eigenschaftsbegriff* scheinen mit diesem dualen Typ zu korrespondieren. Es gibt aber auch durchaus auch Argumente dafür, die Schülerinnen und Schüler dieses Clusters dem *funktionalen Verständnistypen* nach Ubben zuzuordnen (siehe unten) - wenn man z.B. argumentiert, dass sich die Lernenden ja von der Gestalt alleine klar distanzieren haben und den Schwerpunkt auf die Funktionalität legen (vgl. Trajektorienvorstellung).

Ein weiteres Cluster (*Quantenobjekte als Wellen nicht lokalisiert*, vgl. 11.5) fasst 6 Schülerinnen und Schüler zusammen. Diese Lernenden zeigen in weiten Teilen Vorstellungen, die einem elaboriertem Eigenschaftsbegriff zuzuordnen wären. Sie äußern aber mitunter auch dualistische Vorstellungen, insbesondere wird die Präparation von keinem dieser Lernenden genannt. Diese Schülerinnen und Schüler lassen sich tendenziell auch dem dualen Typ zuordnen, wobei der Übergang zum funktionalen Typ natürlich nicht trennscharf ist.

Der funktionale Verständnistyp ist dadurch charakterisiert, dass „ein mentales Modell nur als Repräsentant für Funktionalität verstanden wird und der Gestaltaspekt nur als 'Träger' gesehen wird: In diesem Rahmen wird das mentale Modell als Kodierung für ein abstraktes Wissen verstanden und die Gestalten der mentalen Modelle werden eher als Ankerpunkte oder Stützpfeiler und nicht als Realitätsreplikate empfunden“ [207, S. 54]. Ein Cluster, in das 5 der 25 Befragten einzuordnen sind, wird als *elaborierter Eigenschaftsbegriff* bezeichnet. Alle Befragten dieses Clusters lehnen die permanente Lokalisierung von Quantenobjekten explizit ab, keiner rekurriert in Erklärungen oder Beschreibungen auf einen Bahnbegriff und auch implizite Bezüge sind nicht erkennbar. Diese Schülerinnen und Schüler scheinen wohl dem funktionalen Typ zu entsprechen.

Unabhängig davon, dass die Einteilung der Schülerinnen und Schüler in die berichteten Cluster und deren Zuordnung zu den Verständnistypen nach Ubben in keinem Fall trennscharf ist, zeigt sich: Es gibt zwar eine Streuung in den Vorstellungen der Lernenden, aber immerhin 11 der Interviewten haben elaborierte Vorstellungen entwickelt. 14 scheinen bei überwiegend mechanistisch geprägten Vorstellungen zu verharren. Für eine vierstündige Intervention mit Schülerinnen und Schüler ohne jegliche Vorkenntnisse stellt dies ein ermutigendes Ergebnis dar.



Eine ähnliche Beobachtung macht man auch im Bezug auf die Vorstellungen der Lernenden zum Photon, die naturgemäß eng mit denen zum Eigenschaftsbegriff verwoben sind. In der Interviewstudie findet man clusteranalytisch die drei Vorstellungstypen „Elaborierte Energiequantvorstellung“, „Photon als Lichtteilchen“ und „Energiequant in Teilchengestalt“ (vgl. für Details die Kapitel 11 und 12 dieser Arbeit). Schülerinnen und Schüler des Clusters „Elaborierte Energiequantvorstellung“ dürften nach der Typisierung von Ubben dem funktionalen Verständnistyp zuordnen lassen. Die Lernenden mit der Vorstellung des „Photons als Lichtteilchen“ vereinen alle Voraussetzungen, um sie dem dualen Typ zuzuordnen und die Lernenden mit der „Energiequant in Teilchengestalt“-Vorstellung können wohl mit dem Architektur-Typ oder eventuell auch dem dualen Typ identifiziert werden. Diese Befunde im Bezug auf das Photon und den Eigenschaftsbegriff legen folgendes nahe: Ein Übertrag der Typen des Modellverständnisses von Ubben scheint sich auch domänenspezifisch für einzelne Aspekte der Quantenphysik zu zeigen. Weitere Untersuchungen müssen dies aufklären. Darüber hinaus wurden vorherige Ergebnisse der Schülervorstellungsforschung der Quantenphysik wohl reproduziert, nach denen der „Dreischritt mechanistisches Denken \rightarrow Zwischendenken \rightarrow Quantendenken immer wieder auftaucht“ [207, S. 33] - nicht nur im Bezug auf die Vorstellungen zum Photon. In diesem Fall gäbe es aber folgende Entsprechungen: Vorstellung vom Photon als „Energiequant in Teilchengestalt“ = mechanistisches Denken, Vorstellung vom „Photon als Lichtteilchen“ = Zwischendenken und „Elaborierte Energiequantvorstellung“ vom Photon = Quantendenken.

Zur Wahrscheinlichkeitsdeutung: Ein Großteil der Schülerinnen und Schüler hat eine Vorstellung über den statistischen Charakter der Quantenphysik gewonnen, wie aus der Erhebung mit dem Vorstellungsfragebogen hervorgeht (vgl. Kapitel 10). Im Rahmen der Interviewstudie äußern sich 84% der Befragten explizit dazu, dass sich statistische Vorhersagen in der Quantenphysik stets auf ein Ensemble von Quantenobjekten beziehen.

Besonders fruchtbar scheinen die Diskussionen zum Determinismus gewesen zu sein: 84% der Lernenden konnten angemessen zum Begriff des objektiven Zufalls bzw. des Quantenzufalls Stellung beziehen. Insbesondere die Gegenüberstellung des Antwortverhaltens der Lernenden auf die beiden Aussagen

W_9: Bei ausreichend genauer Kenntnis der Anfangsbedingungen könnte man vorhersagen, ob ein einzelnes Photon am Strahlteiler transmittiert oder reflektiert wird.

und

W_10: Bei ausreichend genauer Kenntnis der Anfangsbedingungen könnte man vorhersagen, könnte man in der klassischen Physik das Ergebnis eines Würfelwurfs vorhersagen.

aus dem Vorstellungsfragebogen ist überzeugend (vgl. Kapitel 14.2.2).

Zusammenfassend kann also davon ausgegangen werden, dass ein Großteil der Schülerinnen und Schüler adäquate Vorstellungen zur Wahrscheinlichkeitsdeutung entwickelt. Etwas differenzierter ist das Bild im Bezug auf den Eigenschaftsbegriff, wie oben ausführlich diskutiert: während ein Teil der Lernenden ein sehr elaboriertes Verständnis aufbaut, verharrern auch einige Schülerinnen und Schüler bei mindestens teilweise mechanistischen Vorstellungen. Hier ist offen, wie sich eine umfassende Behandlung des Zustandsbegriffs auf die Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler auswirken könnte.

14.2.4 Abhängigkeit der Lernwirksamkeit von Geschlecht, Vorwissen und affektiven Merkmalen

FF 4: Ergibt sich für die Lernwirksamkeit des Konzepts eine Abhängigkeit von dem Geschlecht der Lernenden, dem fachspezifischen Prätestergebnis oder affektiven Lernendenmerkmalen?

Mittels einer multiplen linearen Regression wurde ermittelt, dass die durchschnittliche Physiknote ($\beta_{\text{Note}} = -0.24, p < 0.001$), das Interesse an Quantenphysik ($\beta_{\text{Interesse}} = -0.19, p < 0.01$), das fachspezifische Vorwissen ($\beta_{\text{Vorwissen}} = 0.39, p < 0.001$) und das Geschlecht ($\beta_{\text{Geschlecht}} = -0.17, p < 0.05$) statistisch signifikante Prädiktoren des Posttestergebnisses darstellen. Durch Einbezug dieser Variablen konnten $R^2 = 47\%$ der Varianz in der unabhängigen Variable erklärt werden. Der Einbezug weiterer Variablen affektiver Lernermerkmale hätte zu Multikollinearität geführt, sodass die Voraussetzungen für eine Regressionsrechnung verletzt gewesen wären.

Um den Einfluss auf den Lernzuwachs zu untersuchen, ist der Einfluss auf das Posttestergebnis alleine aber natürlich zu wenig:

Affektive Lernermerkmale: Der absolute Lernzuwachs der Lernenden korreliert statistisch hoch signifikant mit dem physikalischen Selbstkonzept der Lernenden ($r = 0.24, p < 0.01$) und mit dem Interesse an Quantenphysik ($r = 0.25, p < 0.01$). Es gibt aber nach Befundlage keinen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen dem Zuwachs im deklarativen Wissen zur Quantenoptik und einer Änderung des Interesses der Lernenden an Physik ($r = 0.10, p = 0.242$); gleiches gilt für einen Zusammenhang von Zuwachs im deklarativen Wissen und der Änderung des Interesses am Experiment im Physikunterricht ($r = 0.07, p = 0.423$). Dies ist in Einklang mit der Erwartung aus der Theorie (vgl. [105]).

Vorwissen: Es zeigt sich ein statistisch höchst signifikanter Zusammenhang von Vorwissen - als fachspezifischem Prätestergebnis - mit dem Posttestergebnis ($r = 0.59, p < 0.001$). Die Korrelation zwischen Vorwissen und absolutem Lernzuwachs ist statistisch unbedeutend ($r = -0.05, p = 0.575$).

Geschlechterspezifische Unterschiede: Im Bezug auf die Unterschiede zwischen Mädchen und Jungen ist deutlich zu unterscheiden, je nachdem mit welchem Blick man auf die erhobenen Daten schaut:

14.2. DISKUSSION

- Geschlechterspezifische Unterschiede zeigen sich signifikant nur bezogen auf das Vorwissen ($t(160) = 5.70, p < 0.001$).
- Kodiervariante 1: Man vergibt einen Punkt im Test nur, wenn die gewählte Antwortmöglichkeit erstens richtig ist und der Schüler bzw. die Schülerin dabei zweitens sicher war.
 - In diesem Fall zeigt sich auch zum Posttestzeitpunkt ein signifikanter Unterschied zwischen Jungen und Mädchen ($t(157) = 4.40, p < 0.001$).
 - Der absolute Lernzuwachs von Jungen ($m = 3.75, SD = 2.02$) und von Mädchen ($m = 3.28, SD = 2.21$) unterscheidet sich nicht statistisch signifikant voneinander ($t(151) = 1.35, p = 0.178$).
- Kodiervariante 2: Man vergibt einen Punkt im Test nur, wenn die gewählte Antwortmöglichkeit erstens richtig ist und dabei zweitens nicht geraten wurde. In diesem Fall bleiben die statistisch signifikanten Unterschiede zum Prätestzeitpunkt zwar bestehen, die mittleren Punktzahl im Posttest gleichen sich aber an.

Im Vorstellungsfragebogen zeigen sich statistisch signifikante Unterschiede. Zwar liegen die mittleren Vorstellungsindizes sowohl für Jungen, als auch für Mädchen, über 33 und sprechen daher für überwiegend quantenphysikalisch geprägte Vorstellungen. Allerdings ist der geschlechterspezifische Unterschied höchst signifikant ($t(119) = 3.59, p < 0.001$). Diese Erhebungsmethode führt auf den Befund, das Mädchen also deutlich weniger quantenphysikalisch geprägte Vorstellungen entwickeln als Jungen.

In der Interviewstudie erkennen wir hingegen, dass in den Clustern, die elaborierte Vorstellungstypen verbinden, keine prinzipielle Überrepräsentation von Jungen festgestellt werden kann:

- Vorstellungen zur Quantenwelt: 60% aller befragter Mädchen sind dem Cluster *Primär elaborierte Vorstellung* zugeordnet, aber nur ein Drittel aller Jungen.
- Vorstellungen zum statistischen Verhalten: 20% aller befragter Mädchen sind dem Cluster *Statistische Ensemblesicht* zugeordnet, aber 27% aller Jungen.
- Vorstellungen zum Photon: 50% aller befragter Mädchen sind dem Cluster *Elaborierte Energiequantvorstellung* zugeordnet, aber nur knapp 27% aller Jungen.
- Vorstellungen zum Eigenschaftsbegriff: 10% aller befragter Mädchen sind dem Cluster *Elaborierter Eigenschaftsbegriff* zugeordnet, aber knapp 27% aller Jungen.

Die Daten deuten zusammengefasst eher darauf hin, dass keine systematische Bevorzugung eines Geschlechts beobachtet werden kann. Viel eher scheint es abhängig von der Untersuchungsmethode zu sein, inwiefern Mädchen im Vergleich zu Jungen abschneiden. Insbesondere darüber, ob Mädchen in geschlossenen Antwortformaten - wie Multiple-Choice-Aufgaben - grundsätzlich benachteiligt sein könnten, existieren mehrere Forschungsarbeiten, wobei in einer aktuellen Arbeit von [76] Argumente dafür vorgelegt werden, dass die Verwendung solcher Frageformate nicht entscheidend für geschlechterspezifische Unterschiede sein soll. Die Frage nach geschlechterspezifischen Unterschieden

bedingt durch das Erlanger Konzept scheint damit zwar nicht abschließend geklärt, aber es zeigt sich in jedem Fall: Sowohl Jungen als auch Mädchen bauen zu bedeutendem Anteil quantenphysikalisch adäquate Vorstellungen auf.

14.2.5 Beurteilung des Erlanger Konzepts durch Lernende

FF 5: Wird das Konzept von den Lernenden als interessant empfunden und bewirkt das Unterrichtskonzept ein verstärktes Interesse an Physik oder am Experiment in der Physik?

Die einzelnen Unterrichtsphasen wurden mittels einer Smiley-Abfrage evaluiert und es zeigt sich, dass die Lernenden alle Unterrichtsphasen mit großer Mehrheit mindestens einigermaßen interessant finden. Insbesondere die Präparation von Quantenzuständen - fast 60% der Lernenden findet das Kapitel sehr interessant -, sowie das Kapitel zur Einzelphotoneninterferenz, das von ebenfalls rund 60% der Lernenden als sehr interessant bewertet wird, stechen heraus.

Das Interesse am Fach Physik bleibt zwischen Prä- und Posterhebung - wie theoretisch zu erwarten [105] - recht stabil. Dasselbe gilt für das Interesse am Experimentieren im Physikunterricht - die Mittelwerte sinken nur minimal ab und zwar für Mädchen etwas stärker als für Jungen, wobei die Unterschiede nicht statistisch signifikant sind ($t_{\text{Int}}(158) = 0.99, p = 0.33; t_{\text{Exp}}(158) = 0.61, p = 0.54$).

14.2.6 Beurteilung des Erlanger Konzepts durch Lehrende

FF 6: Wie wird das Erlanger Unterrichtskonzept von Lehrkräften aus der Praxis beurteilt hinsichtlich der inhaltlich-methodischen Strukturierung und der Praxistauglichkeit?

Die Lehrkräfte beurteilen das Erlanger Unterrichtskonzept zur Quantenphysik aus didaktischer Sicht durchweg positiv: ihrer Ansicht nach wird es in weiten Teilen von Lernenden akzeptiert (4.30 ± 0.64). Als besondere Stärke betonen 60% der Befragten den großen Bezug zur Forschung und 40% heben die Orientierung des gesamten Konzepts am Experiment als Stärke hervor. Damit in Verbindung steht die Einschätzung der Lehrkräfte, dass mit dem Erlanger Unterrichtskonzept ein adäquates Bild moderner Naturwissenschaft gezeichnet werden kann (4.80 ± 0.40) und bei den Schülerinnen und Schülern somit ein gutes Verständnis für naturwissenschaftliche Mess- und Arbeitsmethoden entstehen kann (4.40 ± 0.66).

Auch das bereitgestellte Material wird von den Lehrkräften fast durchweg positiv bewertet. Obwohl das Konzept vom (bayerischen) Lehrplan mindestens in Teilen abweicht (20% der Befragten) und daher der Zeitbedarf für die Umsetzung des Konzepts Probleme mit sich bringen kann (20% der Befragten), wollen alle befragten Lehrkräfte in Zukunft ihren Quantenphysikunterricht mindestens in Teilen am Erlanger Unterrichtskonzept orientieren.

14.2. DISKUSSION

Inhaltlich wird dabei wohl tendenziell die Herleitung des Antikorrelationsfaktors ausgeschlossen: 50% der Lehrkräfte empfinden die Anforderungen dabei als zu hoch und denken, dass eine qualitative Diskussion über Triplekoinzidenzen im Experiment zum Einzelphoton am Strahlteilerwürfel ausreichend ist.

Zusammengefasst empfinden die Lehrkräfte das Erlanger Unterrichtskonzept als inhaltlich-methodisch gelungen und schätzen es in weiten Teilen als praxistauglich ein: 9 von 10 Befragte empfehlen das Konzept nach eigenen Angaben an Kolleginnen und Kollegen weiter.

KAPITEL 15

Ausblick

„Jede neue Sprache ist wie ein
offenes Fenster, das einen neuen
Ausblick auf die Welt eröffnet und
die Lebensauffassung weitet.“

- Frank Harris

In dieser Arbeit wurde der Versuch vorbereitet und erprobt, Schülerinnen und Schüler mit modernen Experimenten der Quantenoptik in Berührung zu bringen. In den einführenden Kapiteln wurde immer wieder die Kluft aufgezeigt, die herrscht zwischen den Quantentechnologien, an denen mit immer mehr Aufwand geforscht wird auf der einen Seite und der Quantenphysik, wie sie in der Schule überwiegend vermittelt wird auf der Anderen. Das Erlanger Unterrichtskonzept wurde mit dem Ziel entwickelt, ein Angebot für schulisches Lernen machen zu können, um genau diese Kluft zu überwinden.

Der Einsatz vielfältiger Untersuchungsmethoden in einer Mixed-Methods-Studie lässt ein mehrperspektivisches Bild über die Lernprozesse der Schülerinnen und Schüler zur Quantenoptik entstehen: So konnten wir Indizien dafür präsentieren, dass Schülerinnen und Schüler der gymnasialen Oberstufe Interesse an moderner Quantenphysik, so wie sie im Erlanger Konzept vermittelt wird, haben - die Lernenden scheinen empfänglich für Einflüsse aus Forschung und Technik zur Quantenphysik. Dies zeigen nicht nur die deutlichen Zuwächse im deklarativen Wissen, sondern insbesondere die Untersuchungen zu den Vorstellungen der Lernenden. Es werden dabei zwar viele Schülervorstellungen aus vorheriger Schülervorstellungsforschung wieder gefunden, wie etwa mechanistische Denkweisen, allerdings zeigte sich auch deutlich: eine Teilmenge der befragten Schülerinnen und Schüler zeigte keinerlei Einflüsse mechanistisch geprägter Vorstellungen mehr. Insbesondere ist eine Replikatvorstellung nur sehr selten bei Lernenden festzustellen. All dies zeigt: Quantenphysikunterricht, der Schülerinnen und Schüler bis hin zu den Quantentechnologien führt oder zumindest uneingeschränkt anschlussfähig ist, ist in der gymnasialen Oberstufe möglich.

Der Fuß bei der empirischen Beforschung des Unterrichts moderner Quantenphysik an Schulen ist nun in der Tür, aber von abschließenden Antworten auf die Forschungsfragen

kann trotz all dieser Befunde nicht die Rede sein. Es liegt also auf der Hand, dass weiterer Forschungsaufwand notwendig sein wird, z.B. im Bezug auf die folgenden Aspekte:

- Fachdidaktische Folgeuntersuchungen könnten - nach einer Überarbeitung des Erlanger Konzepts auf Basis der hier berichteten Ergebnisse - in größerem Umfang die Lehrkräfte einbeziehen. Dabei sind in Zukunft hypothesentestende Studien in realen Unterrichtssituationen durchzuführen, in denen man mit einzelnen Lehrkräften arbeitet, die Bereitschaft zur Schulung zeigen.
- Der sinnvoll geplante Vergleich mit Teilen anderer Unterrichtskonzepte sollte vorangetrieben werden, um jedes Konzept für sich und den Quantenphysikunterricht als Ganzes zu optimieren: dabei kann es sinnvoll sein zunächst nur solche Teile in Vergleichsstudien gegenüberzustellen, anhand derer man den Anforderungen an Vergleichsstudien gerecht werden kann (vgl. Kapitel 4).
- Zur Einschätzung darüber, welche vorunterrichtlichen Vorstellungen zur Quantenphysik Schülerinnen und Schüler bereits in den Unterricht mitbringen, scheinen Interviewstudien mit solchen Probanden geeignet, die bisher keinen Quantenphysikunterricht hatten. Insbesondere sollten die Quellen dieser Vorstellungen beforscht werden, denkbar sind etwa informelle Lernsysteme wie YouTube oder außerschulische Lernorte, wie Schülerlabore oder Science Center. Solche Kenntnisse helfen bei der Optimierung von Unterrichtskonzepten zur Quantenphysik naturgemäß.
- Die Entwicklung eines anerkannten Testinstruments zur modernen Quantenphysik ist unbedingt anzustreben. Nur so sind in Zukunft überhaupt vergleichbare Evaluationsergebnisse möglich. Es ist dabei ein solcher Test zu entwickeln, der die unterschiedlichen Wissensniveaus gleichermaßen abfragt, also von der Reproduktion bis hin zum Transfer reicht. Dieser Test muss in jedem Fall das Kondensat an Inhalten als Fundament besitzen, von dem die fachdidaktische Community ausgehen will: in den Augen des Autors dieser Arbeit müssen das die Wesenszüge der Quantenphysik von [110] sein und bleiben. Allerdings kann ein Einbezug von anderen Aspekten sinnvoll sein, wie beispielsweise zu Experimenten in der Quantenphysik. Dies könnte besonders bei einem browserbasierten Testinstrument gelingen, etwa nach Vorbild des Tests von [205]. Dieser wäre auch für den Einsatz in Largescale-Assessments geeignet.
- Außerdem mag es von Interesse sein, inwiefern ein Einsatz des Erlanger Konzepts auch schon am Ende der Mittelstufe möglich ist, also vor der Entscheidung für oder gegen das Fach Physik in der Oberstufe.

Die Didaktik der Quantenphysik ist ein aktiver Teil der Physikdidaktik und nicht zuletzt aufgrund internationaler Bekenntungen zur Förderung von Quantentechnologien mehr denn je dazu verpflichtet, Beiträge zu leisten, um die Schülerinnen und Schüler von heute auf die Anforderungen der Zukunft vorzubereiten. Mehr als die Anfänge sind nun gemacht: ein anerkanntes begriffliches Rahmenwerk zum Lernen von und Sprechen über Quantenphysik ist längst etabliert [143, 110]. Auch über die Struktur der Vorstellungen Lernender liegen immer genauere Erkenntnisse vor [207]. Außerdem wurde in verschiedenen Arbeiten in der jüngeren Vergangenheit auf die Notwendigkeit einer Modernisierung

des Quantenphysikunterrichts ganz konkret hingewirkt [26, 214]. Mit dem hier berichteten Forschungsprojekt wurden an diese Arbeiten anknüpfend erste Einblicke in das schulische Quantephysiklernen von und mit quantenoptischen Experimenten gewonnen - und diese Einblicke sprechen dafür, dass den Schülerinnen und Schülern damit ein neuer Ausblick auf die Welt eröffnet und damit ihre Lebensauffassung erweitert werden kann.

Danksagung

Zum Entstehen dieser Arbeit haben viele Personen direkt oder indirekt beigetragen. Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr. Jan-Peter Meyn für die Überlassung des Themas, die Bereitstellung von Mitteln zur Realisierung des Forschungsvorhabens und die Freiheit im Arbeiten, die ich schon als Doktorand genießen durfte. Vielen herzlichen Dank!

Ganz ausdrücklich danken möchte ich auch Herrn Prof. Dr. Rainer Müller (Universität Braunschweig), für zahlreiche Gespräche zur Didaktik der Quantenphysik und für weit darüber hinausgehende Ratschläge. Ich danke Ihnen vielmals!

Zum Dank verpflichtet bin ich auch Herrn Dr. David Woitkowski (Universität Paderborn), der mir gerade zu Beginn meines Vorhabens mit viel Unterstützung bei Fragen zur Testentwicklung weitergeholfen hat. Ich danke ebenfalls Herrn Prof. Dr. Horst Schecker (Universität Bremen) für Hilfe, Bestätigung und Zuspruch bei Fragen zur Testentwicklung. Herrn Andreas Kral (Universität Aachen) danke ich für wertvollen Austausch über seine Erfahrungen zur Quantenphysik an Schulen, der diese Arbeit sehr bereichert hat. Darüber hinaus danke ich all meinen Kolleginnen und Kollegen der Quantenphysik-Didaktik: allen voran danke ich Dr. Kim-Alessandro Weber (Universität Hannover) für Einweisungen in das quantenoptische Experiment und Malte Ubben (Universität Münster) danke ich für zahlreiche Diskussionen über Schülervorstellungen und Modellverständnisse zur Quantenphysik.

Ich danke ferner meiner Kollegin Frau Dr. Angela Fösel für die freundliche Aufnahme in die Arbeitsgruppe der Physikdidaktik in Erlangen und die gute Zusammenarbeit. Auch Frau Dr. Anna Donhauser (jetzt Universität Kaiserslautern) sei für die gute und freundschaftliche Zusammenarbeit gedankt. Mein Dank geht an dieser Stelle auch an Frau Renate Katscher.

Ausdrücklich danken möchte ich meinen beiden studentischen Hilfskräften Elisabeth Bunzel und Bianca Winkler für die grandiose Unterstützung bei der Umsetzung meiner Studie. Ganz besonderer Dank gilt dabei natürlich den vielen Schülerinnen und Schülern sowie ihren Lehrkräften für die Teilnahme an dieser Studie. Ohne Euch wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen!

Teil V
Anhang

ANHANG A

Zu Kapitel 2

Die folgenden Unterlagen sind Kapitel 2 dieser Arbeit beigelegt:

- Arbeitsblätter zum Unterrichtskonzept
- Rahmenartikulationsplan zur Umsetzung des Unterrichtskonzepts in der Hauptstudie
- Die interaktiven Bildschirmexperimente und das Erklärvideo finden sich auf der Daten-CD

Detektion von Licht



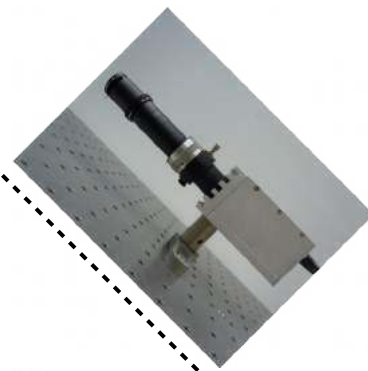
Kommunikation im Netz
Abhörsicher mithilfe der Quantenphysik?
 Stand: 16.12.2018 13:43 Uhr

Wer im Internet miteinander kommuniziert, hinterlässt unweigerlich Spuren. Wiener Forscher wollen jetzt ein Verfahren entwickelt haben, das die Kommunikation auch in einem größeren Netzwerk abhörsicher macht.

Die Quantenkryptografie will in Zukunft eine abhörsichere Kommunikation im Internet ermöglichen. Österreichische Forscher haben nun - nach eigenen Angaben - eine wichtige Meile auf diesem Weg genommen. Ihnen gelang, dass vier Teilnehmer eines Netzwerkes abhörsicher kommunizieren können. Die Wissenschaftler um Rupert Ursin vom Wiener Institut für Quantenoptik und Quanteninformation der Österreichischen Akademie der Wissenschaften haben ihre Forschung im britischen Fachblatt "Nature" vorgestellt. Nach Angaben der Wissenschaftler lässt sich das Netzwerk einfach erweitern - und könnte so für eine breite Anwendung infrage kommen.

Hierkömmliche Verschlüsselungstechnologien bieten nur relativen Schutz, sagt Rupert Ursin von der Akademie der Wissenschaften im Gespräch mit dem ORF: "Wenn ich meine E-Mail lese, könnte ein Dritter im Prinzip beliebig viele Kopien davon anfertigen - und es würde niemand bemerken. Bei der Quantenkryptografie ist das unmöglich. Wenn Hacker versuchen, eine Quantenbotschaft zu belauschen, hinterlassen sie unweigerlich eine Spur. Das ist ein Naturgesetz."

AUS DEM ARCHIV
 Geheimdienstkontrollen tagen erstmals öffentlich, 05.10.2017
 NSA-Affäre: Die Hardys der Angela Merkel, 24.10.2013
 Kryptohandy im Bundestag kaum genutzt, 15.09.2014
 Bundestag-Netzwerk: Nach dem Angriff ist vor dem Angriff, 20.12.2015
 Zentrum für Cyber-Abwehr: Die Arab-Hacker der NATO, 24.06.2017
 CEE-Kongress: Tausende Hacker kommen nach Hamburg, 27.12.2015 | ndr
 Cyber-Kriminalität: Hacker im Namen des Guten, 07.02.2012
 12000 mal die bekanntesten Hacker zum Sicherheitschef, 29.04.2011
 Marouff schließt Sicherheitslücke im Internet Exploit, 21.01.2010
 Bundesamt warnt vor Sicherheitslücken beim Internet Exploit, 15.01.2009



Verschlüsselung

Sicher trotz Quantencomputern

Quantencomputer könnten praktisch alle Verschlüsselungen brechen. Post-Quanten-Kryptografie soll unsere Kommunikation absichern, wenn die klassischen Verfahren versagen.

Von Hanno Böck

5. Oktober 2014, 13:27 Uhr / 56 Kommentare

Betrachte nun das Video und höre genau hin. Nutze die Informationen, um die folgende Tabelle auszufüllen!
 Was haben die oben abgebildeten Grafiken mit der Detektion von Licht zu tun?

DIE SCHNEELAWINENANALOGIE

| Avalanche Photo Diode | Schneelawine |
|---|---|
| Ladungen auf hohem el. Potential | Ansammlung von Schnee auf einem Hügel |
| Freigesetzte Elektronen setzen wiederum Elektronen frei | Die Schneemasse wird durch sehr geringe mechanische Störung freigesetzt |
| | Spontaner (kleinerer) Schneeabgang |

DAS EXPERIMENT

Aufbau und Durchführung:

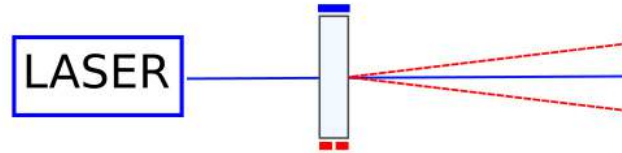
Beobachtung:

Merke: Nimmt der Detektor eine Energieportion auf, _____

Einzelphotonenquelle



Eine mögliche Realisierung einer Einzelphotonenquelle kann auf verschiedene Arten gelingen, beispielsweise durch Anregung von Atomen, die bei der Rückkehr in den Grundzustand Photonen emittieren. Eine für experimentelle Zwecke einfachere Möglichkeit stellen besondere Kristalle dar. Durch Anregung mit einem blauen Laser emittiert der β -Bariumborat-Kristall (kurz: BBO) schwaches Licht in Form zweier Photonen. Der blaue Laser hat eine Wellenlänge $\lambda = 405\text{nm}$. Die beiden Zwillingphotonen werden von dem Kristall jeweils unter einem Winkel von 3° zur optischen Achse ausgesandt.



AN DIE PHYSIKEXPERTEN...

Hast du eine Idee welche physikalischen Grundprinzipien bei diesem Prozess im Kristall greifen? Begründe damit die Symmetrie bei der Emission der beiden Photonen. Bestimme außerdem die Wellenlänge des emittierten Lichts.

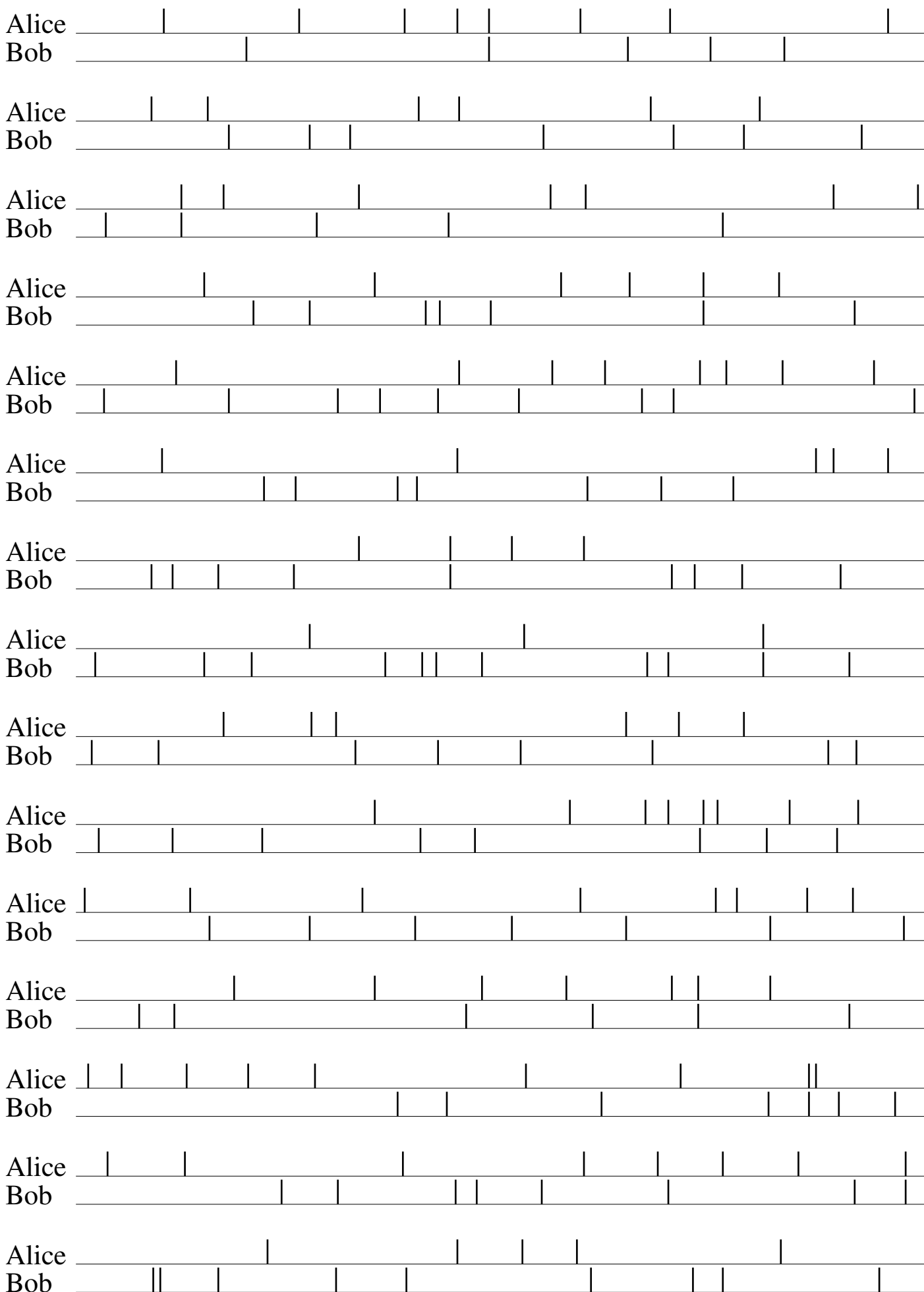
MESSERGEBNISSE

Der Graph auf dem dir ausgeteilten Zettel zeigt die Detektionsereignisse zweier Detektoren aufgetragen gegen die Zeit. Betrachte diese Abbildungen: Was fällt dir auf? Vergleiche deinen Zettel auch mit dem deines Nachbarn bzw. deiner Nachbarin. Notiere deine Beobachtungen!

- _____
- _____
- _____
- _____
- _____

KOINZIDENZMESSUNGEN

Jedem der Striche auf deinem Zettel entspricht einem _____ des zugehörigen Detektors. Die Klicks der beiden Detektoren sind _____ und folgen keinem festgelegten Muster. Manchmal liegen die Striche genau übereinander. Das bedeutet, dass dann _____
_____. Das gleichzeitige Eintreten eines Detektorereignisses wird als _____ bezeichnet. Eine _____ (bis auf Zufällige) war ein _____, das im Kristall erzeugt wurde. Der eine Detektor fungiert dann als _____ für den anderen; man spricht daher auch oft von einem Paar _____. Diese Messmethode nennt man Koinzidenzmessung. Dies ist notwendig, um die Einzelphotonen vor dem _____ zu diskriminieren. Man sagt: Photonen werden in dem BBO-Kristall aus dem Licht _____, statt Licht besteht aus Photonen.



Licht am Strahlteilerwürfel (IBE)



Experiment:

Nachfolgend ist der Aufbau eines Experiments skizziert, mit Hilfe dessen man etwas über den Strahlteilerwürfel (siehe oben rechts) lernen kann. Skizzieren Sie Ihre Beobachtung aus dem Experiment und vervollständigen Sie dazu einen Merksatz!

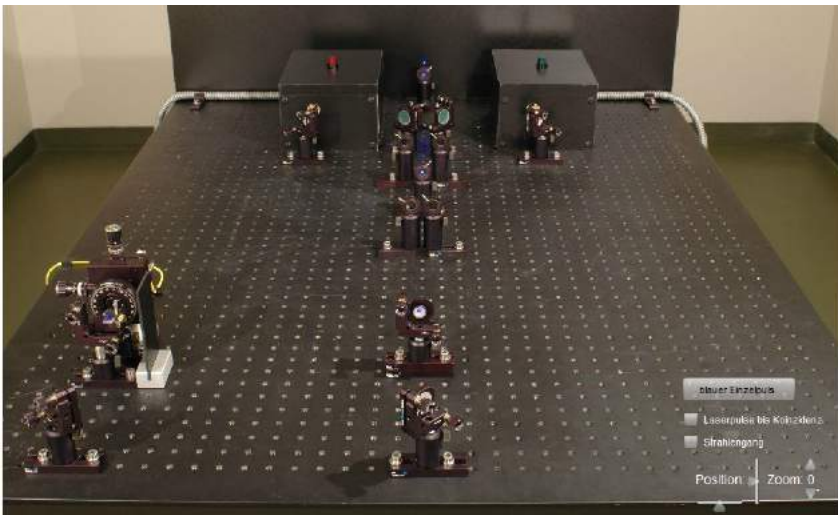
LASER



Der Strahlteilerwürfel ist ein optisches Bauelement, das aus zwei an ihrer _____ verkitteten _____ besteht. Das Prinzip, nach dem ein Strahlteilerwürfel funktioniert, ist die _____. Dabei wird ein einzelner Lichtstrahl in zwei Teilstrahlen getrennt: nämlich in einen _____ und einen _____ Strahl.

EINZELNE PHOTONEN AM STRAHLTEILER

Nachfolgend ist das Ihnen bereits bekannte Koinzidenzexperiment skizziert. Begründen Sie, wie Sie den experimentellen Aufbau ändern würden, um das Verhalten einzelner Photonen am Strahlteiler zu untersuchen!



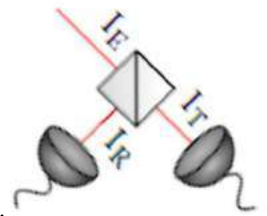
Begründung:

INTERPRETATION DER ERGEBNISSE DES EXPERIMENTS

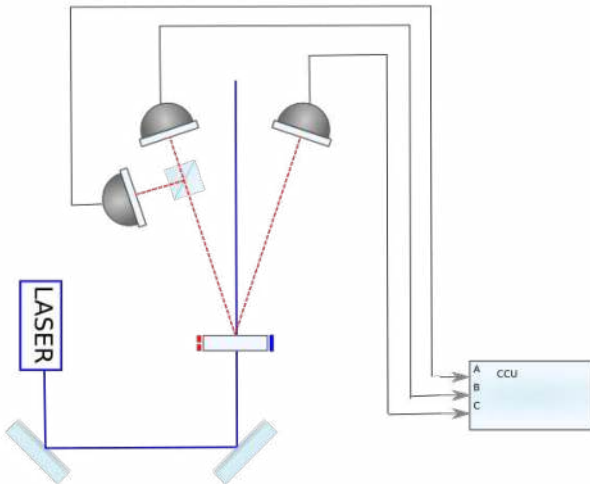
Zu den Grundaufgaben von Wissenschaftlern gehört es aufgenommene Daten zu interpretieren und Schlussfolgerungen begründet zu formulieren. Verbalisieren Sie hier Ihre Beobachtungen aus dem Experiment und geben Sie eine Schlussfolgerung an. Finden Sie anschließend einen Konsens mit Ihrem Banknachbarn bzw. Ihrer Banknachbarin und zum Abschluss innerhalb Ihrer Klasse bzw. Ihres Kurses:

| | |
|------------------------|--|
| Persönliche Einordnung | |
| Konsens mit NachbarIn | |
| Konsens in der Gruppe | |

Unteilbarkeit des Photons



Die gemeinsame **Schlussfolgerung** aus dem letzten Experiment war die Existenz des Photons und seine Unteilbarkeit. Der Aufbau des durchgeführten Experiments ist nachfolgend schematisch noch einmal dargestellt. Nun soll die Schlussfolgerung wissenschaftlich überprüft werden. Dazu müssen die am Bildschirm angezeigten Zählraten genauer analysiert werden.



Die Zählraten, die am Bildschirm angezeigt werden benennen wir nun folgendermaßen:

| | |
|--|--|
| | |
| | |
| | |

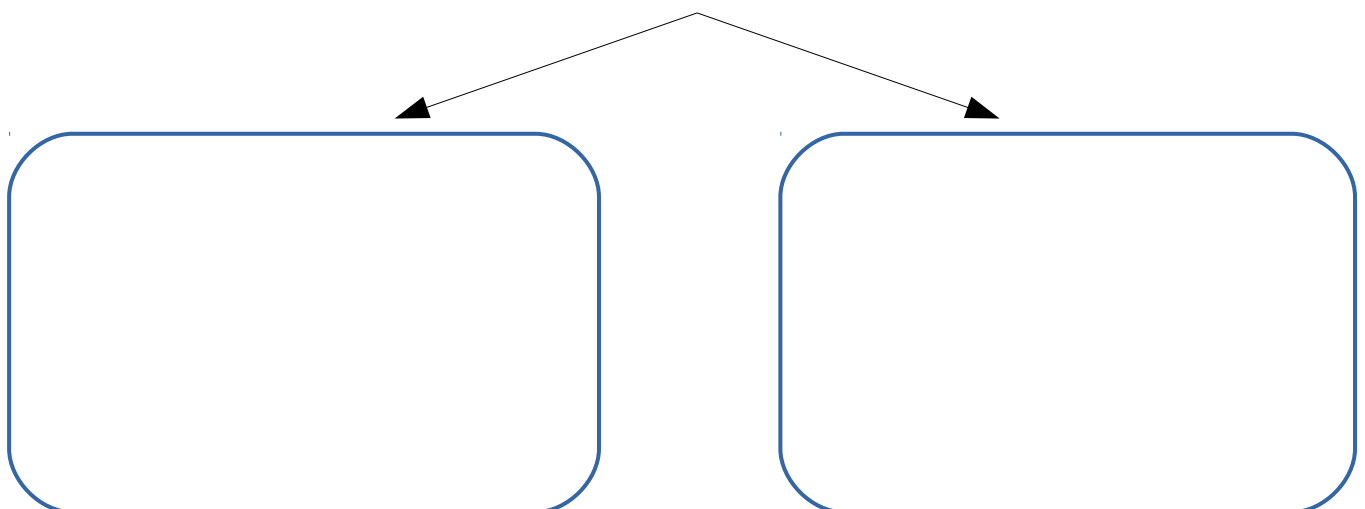
Die Zählrate N , die ein Detektor misst, und die Wahrscheinlichkeit für einen Klick des Detektors hängen wie folgt zusammen:

(◇)

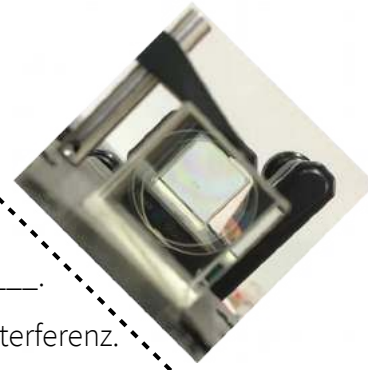
Erinnerung: Für stochastisch unabhängige Ereignisse A und B gilt $P_{AB} = P_A \cdot P_B$.

Aufgabe: Schreiben Sie die Gleichung $P_{BTR} = P_{BT} \cdot P_{BR}$ mit Hilfe von (◇) derart um, dass nur noch Zählraten auftauchen.

Folgerung:



Einzelphotoneninterferenz (IBE)



WAS WAR INTERFERENZ GLEICH WIEDER?

Unter Interferenz versteht man die _____.

Man unterscheidet _____ und _____ Interferenz.

Optische Aufbauten, in denen Licht aufgeteilt und überlagert wird, nennt man _____.

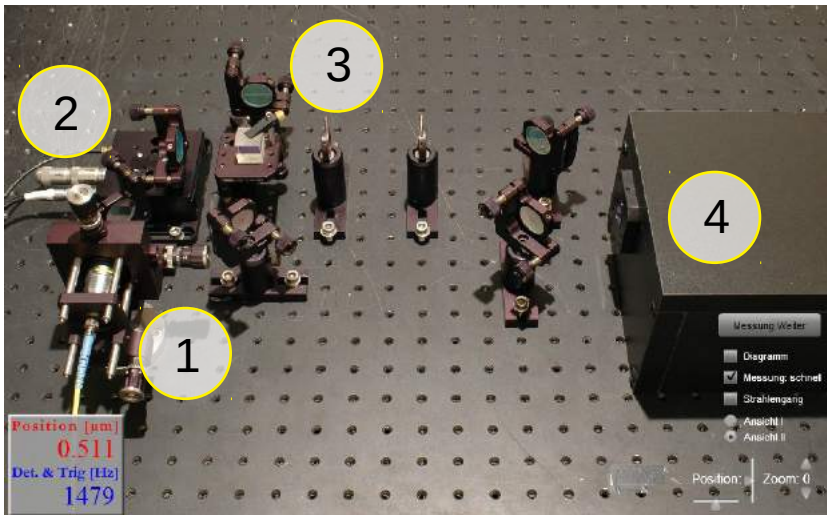
Ein Beispiel für ein Interferometer ist das sog. Michelson-Interferometer.

MICHELSON-INTERFEROMETER



Aufgabe: Skizzieren Sie einen schematischen Aufbau des Michelson-Interferometers und deuten Sie außerdem den Strahlenverlauf an!

DAS EXPERIMENT VON GRANGIER, ROGER UND ASPECT (1986)



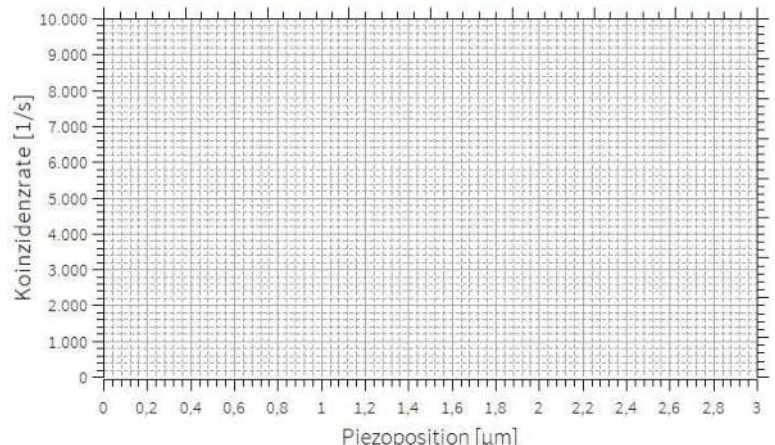
- 1: _____
- 2: _____
- 3: _____
- 4: _____

SCHLUSSFOLGERUNG

Photonen verhalten sich im Michelson-Interferometer wie _____.

Das Wellenmodell von Licht _____.
 Die Vorstellung des Photons als lokalisiertes Teilchen ist _____.
 Ein Photon ist also _____.

Einzelne Photonen im Michelson-Interferometer



Rahmenartikulation für summative Evaluation

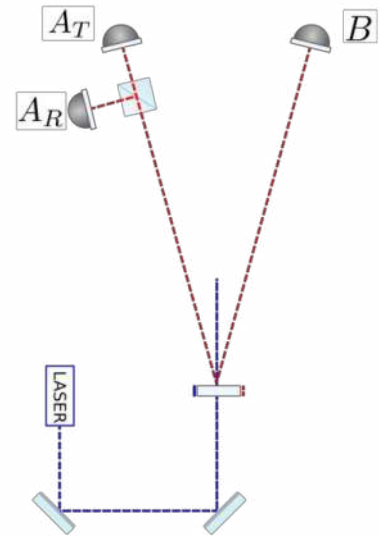
| | |
|---|--|
| Prätest: Begrüßung, Vorstellung und Durchführung Prätest | |
| 1. Stunde | <p>Opening-Page auf erstem AB diskutieren: Bedeutung der Quantenphysik heute? Datensicherheit, Abhörsichere Kommunikation, Quantentechnologie, ...</p> <p>Wir wollen das Photon als Quantenobjekt genauer untersuchen. Dafür müssen wir uns erst einmal Photonen auf reproduzierbare Art und Weise „beschaffen“.</p> <p>Im ersten Schritt beschäftigen wir uns mit dem messen von Photonen, also dem Detektieren von Licht.</p> <p>Impuls: Wie funktioniert nun der Detektor? Erklärvideo und parallel: SuS füllen Tabelle in Einzelarbeit; dann Murmelgruppen von Besprechung im Plenum.</p> <p>IBE: Start_Detektor SuS formulieren Beobachtungen eigenständig => testen ihrer Hypothesen mittels IBE. Elaboration der Schneelawinenanalogie.</p> <p>Merksatz zur Funktionsweise der Detektoren wird von den SuS selbstständig vervollständigt.</p> <p>Text auf AB „Einzelphotonenquellen“ gemeinsam lesen und atomare Anregung am Beispiel von Zwei- und Dreiniveausystem diskutieren.</p> <p>Impuls: Ist Anregung und Relaxation von Atomen sinnvolle Quelle für Einzelphotonenquelle? Diskussion in Klasse und Vorstellung von nichtlinearem Kristall in Analogie zu einem Zweiniveausystem.</p> <p>Impuls: Grafik auf AB „Einzelphotonenquelle“ besprechen und Koinzidenzzettel einführen. Aufgabe: Notiere deine Beobachtungen Beobachtungen besprechen, wichtig: 1. Zufällige Verteilung der Striche, 2. Manchmal übereinander</p> |
| 2. Stunde | <p>Lückentext zur Koinzidenzmessung gemeinsam ausfüllen zur Wiederholung. Betonung des Präparationsgedankens und kritisches Hinterfragen des Titels des Arbeitsblatts.</p> <p>Impuls: Wer findet eine bessere Übersicht? => Einigung auf: Präparation von Einzelphotonen. Abschluss mit IBE für Einblick in Labor.</p> <p>IBE: Aufbau_Koinzidenzexperiment_Neue_Texte</p> <p>Jetzt wissen wir, wie wir Einzelphotonen präparieren können. Jetzt wollen wir mit ihnen experimentieren.</p> |

Impuls: Strahlteiler vorstellen

Experiment zeigen (Laserstrahl auf Strahlteiler) und SuS nachzeichnen lassen => Merksatz zu Strahlteilerwürfel gemeinsam ausfüllen lassen..

Frage: Wenn Licht sich am Strahlteiler so verhält, tun das dann Photonen auch?

=> Du als Photonenexperte: „Wie würdest du das skizzierte Experiment verändern, um das Verhalten einzelner Photonen am Strahlteiler zu untersuchen?“ => Think-Pair-Share. Ergebnis ist das Bild vom Arbeitsblatt zu „Unteilbarkeit des Photons“:



Durchführung des Experiments mittels IBE

IBE: Start_Zufall_getr

IBE: Existenz_K

=> Beobachtung der Ergebnisse in Tabelle auf Arbeitsblatt „Licht am Strahlteilerwürfel“ eintragen.
=> Think-Pair-Share: „Was sehen wir? Was denken wir zu sehen?“
=> Unteilbarkeit als Ergebnis? Triplekoinzidenzen sind Fälle, bei denen sich Photon teilt?

Zentrale Frage: Ist die Rate der Triplekoinzidenzen ($\neq 0$) auf zufällige Koinzidenzen zurückzuführen oder teilt sich Photon hier vielleicht doch?

=> AB „Unteilbarkeit des Photons“

=> Auf Tabelle: Was zeigt uns der Bildschirm für Zahlen – Vereinbarung von Notation im Lehrervortrag.

- N_B = Zählrate am Triggerdetektor (Alice oder Bob, hier o.B.d.A. Bob)
- $N_T = N_{D1}$ = Zählrate am transmittierten Ausgang des Strahlteilers
- $N_R = N_{D2}$ = Zählrate am reflektierten Ausgang des Strahlteilers
- N_{BT} = Koinzidenzrate zw. Trigger und Det. Am transmittierten Ausgang
- N_{BR} = Koinzidenzrate zw. Trigger und Det. Am reflektierten Ausgang
- N_{BTR} = Triplekoinzidenzrate zw. Trigger + transmittierten + reflektierten Ausgang

3. Stunde

Wir wollen untersuchen: Sind die wenigen auftretenden Triplekoinzidenzen zufällig? Ist Photon wirklich unteilbar?

Frage: Was wäre denn, wenn es doch teilbar wäre? Was würden wir experimentell denn dann beobachten? Welche Zählrate wäre dann auch hoch?

Teilt sich das Photon, so sind Triplekoinzidenzen die Regel, nicht die Ausnahme. Um das zu prüfen, will der Physiker das quantifizieren, so a la was bedeutet „wenig oder viel“? Dafür machen wir zwei Annahmen:

1. Prozentrechnung: Grundwert = Zahl der Experimente => Zahl der Ereignisse am Detektor X ...
2. Erinnerung: Ihr sagtet, die Striche sehen zufällig und unabhängig aus => Mathematisch: Stochastisch Unabhängig => $P(X) \cdot P(Y) = P(X \text{ und } Y) = P(X \text{ koinzident mit } Y)$, Beispiel des Würfens zweier fairer Würfel

Ableitung von Antikorrelationsfaktor im Lehrervortrag

Ergebnis: Alpha zieht Grenze zwischen Quantendomäne und klassischer Welt (Laserlicht = Grenze = Alpha = 1)

=> Messung des Antikorrelationsfaktors im Labor

IBE: Existenz_G2

=> Ergebnis: Photonen am Strahlteiler antikorreliert (entweder T oder R)

=> Klassisches Licht am Strahlteiler korreliert (T und R)

4. Stunde **Impuls: Zitat von Einstein zeigen => Stimmt das? Dürfen wir uns Photonen als Teilchen, wie Billiardkugeln vorstellen?**

AB „Einzelphotoneninterferenz“: Bild „MI-Interferometer“ zeigen => Erinnerung an Interferenz => Interferometer zeigen => Text ausfüllen => Skizze zum Interferometer selbst anfertigen lassen

Nun: Licht zeigt also das Wellenphänomen „Interferenz“, aber was ist mit Photonen => Experiment von Grangier, Roger und Aspect (1986).

=> Abbildung beschriften

IBE: „Interferenz_Photon“

=> SuS haben Aufgabe, die Kurve mitzuzeichnen => Was misst man? Was sieht man? Was glaubt man zu sehen?

Gemeinsames Ausfüllen der Schlussfolgerung.

Posttest: Durchführung Posttest

ANHANG B

Zu Kapitel 3

Die folgenden Unterlagen sind Kapitel 3 dieser Arbeit beigefügt:

- Leitfaden zur Durchführung der Akzeptanzbefragung
- Die Transkriptionen der Akzeptanzbefragung finden sich auf der Daten-CD

AKZEPTANZBEFRAGUNG

*Aspekte quantenoptischer Realexperimente
aus dem
Erlanger Unterrichtskonzept*

LEITFADEN



1. Einleitung

- Begrüßung: Name erfragen + eigene Person & Hintergrund vorstellen
- Ziel unserer Forschung an der Uni ist es, den Physikunterricht zu verbessern. Konkret möchten wir dazu beitragen, dass Schüler die moderne Quantenphysik kennen lernen. Durch die Teilnahme an diesem Interview unterstützt du unsere Forschung maßgeblich und dafür möchte ich dir schon einmal im Vorhinein danken.
- Das Interview selber findet anonym statt und wir erwarten auch nicht, dass du dich bereits mit dem Thema auseinandergesetzt hast und die Antworten kennst. Damit wir wissen, welche physikalischen Erklärungen noch verbessert werden müssen, ist es wichtig, dass du im folgenden Interview offen sagst, was du denkst, was du unlogisch findest, was du nicht verstehst, usw. Das Interview findet anonym statt und du bekommst keine Note.
- Hast du noch irgendwelche Fragen, bevor wir anfangen?
- Wir benötigen von dir lediglich deine letzten beiden Zeugnisnoten in Physik, bevor wir anfangen können.

Einschalten des Aufnahmeegeräts

2. Komponenten quantenoptischer Experimente und deren Wirkung auf Lernende

2.1 Key Idea 1: Vom Laser zum Kristall

- Was du hier siehst, ist ein Experiment aus der Quantenoptik, wie man es heute in modernen Forschungslaboren verwendet.
- In der nächsten Zeit werden wir uns sukzessive und nacheinander die einzelnen Bauteile etwas genauer anschauen und ich werde dir erklären, was wir hier alles sehen!
- Wir führen hier Experimente mit einzelnen Photonen durch mit dem Ziel Aussagen über das Verhalten von Quantenlicht und unsere Vorstellung davon zu treffen.
- Sieh dir das Experiment einmal genauer an: Was du hier siehst, ist ein Laser, zwei Umlenkspiegel, ein besonderer Kristall, den wir uns später genauer ansehen werden, zwei Blenden, und zwei Detektoren. Der Laser ist genau auf den Kristall gerichtet.
- Du wirst dich sicher fragen, weshalb wir diese zwei Spiegel verwenden. Damit können wir den Laserstrahl entlang der Lochresterreihe ausrichten (hinzeigen). Siehst du, wenn ich hier an den sog. Justageschrauben drehe, kann ich den Laserstrahl beliebig ausrichten.
- Dies ermöglicht zusammen mit den beiden Blenden eine sehr genaue Justage. Da eine Gerade durch zwei Punkte eindeutig festgelegt ist, ist unser Ziel, dass der Laserstrahl durch die Mitte der

beiden Blenden geht. Dies schaffen wir mit den Spiegeln bei vollständig geschlossenen Iriden. Hast du bis hierhin eine Frage?

- Okay, weiter geht es mit dem Ziel, dass wir den Kristall mit dem Laser ziemlich mittig treffen. Wie gesagt, was es mit dem Kristall auf sich hat, klären wir später.
- Dazu verwenden wir diese Fluoreszenzscheibe. Auf dieser ist exakt die Mitte markiert, diese Mitte stimmt später mit der Mitte des Kristalls überein, weil wir die beiden Halterungen austauschen können. Ich schiebe diese Scheibe jetzt exakt in den optischen Weg.
- Jetzt weiß ich, wo der Kristall stehen muss.

2.2 Key Idea 2: Der BBO-Kristall

- Gut, dann machen wir einmal weiter und schauen uns den Kristall einmal an.
- Dieser fungiert hier gemeinsam mit dem Laser als eine Einzelphotonenquelle. Durch Anregung mit dem blauen Laser emittiert dieser BBO (Beta-Bariumborat)-Kristall schwaches Licht in Form zweier Photonen.
- Der Prozess wird parametrische Fluoreszenz genannt. Der Prozess im Kristall geschieht natürlich unter Beachtung von Energie- und Impulserhaltung. Das Fluoreszenzlicht wird daher unter einem Winkel von 3° zur optischen Achse ausgesandt. Die Wellenlänge des einfallenden Lichts beträgt 405nm und die Energie des Lichts ist proportional zur Lichtfrequenz, also umgekehrt proportional zur Wellenlänge. Daher wird rotes Licht der Wellenlänge 810nm emittiert.
- Diesen Emissionskegel kann ich dir einmal mit Hilfe des folgenden Objekts visualisieren (DOE einstellen). Allerdings wirst du den Kegel nicht sehen, wenn wir den Kristall in das Experiment einbauen, denn die Intensität des Lichts ist zu gering.
- Weil die Intensität des Lichts zu gering ist, benötigen wir spezielle Geräte, die dieses Licht doch noch registrieren können, aber das schauen wir uns später an.
- Dieser Kristall, der emittiert nun, wenn er mit dem blauen Laser bestrahlt wird, zwei Photonen unter dem Winkel von 3° zur optischen Achse.

2.3 Key Idea 3: Detektion von Licht

- Wir benötigen also eine Möglichkeit das schwache Fluoreszenzlicht zu detektieren.
- Dazu denke doch einmal an Nachtsichtgeräte: Restlichtverstärker. Dazu habe ich dir hier ein Video mitgebracht, sieh dir das einmal an.
- So etwas ähnlich können diese Detektoren hier auch. Hier wird im Inneren eine Hochspannung erzeugt und damit befinden sich hier viele Elektronen auf hohem elektrischen Potential. Dazu wird der Detektor mit einer Gleichspannung versorgt.

- Es reicht wenig Licht aus, um Elektronen freizusetzen. Diese setzen wiederum Elektronen frei und immer so weiter. Die Zählelektronik gibt dann entsprechend eine Zahl aus, nämlich die sog. Counts / Sekunde. Desto höher die Lichtintensität, desto größer die Zahl der Pulse.
- Diese Detektoren nutzen sog. Avalanche Photo Diode und Avalanche heißt übersetzt „Lawine“.
- Man kann diesen Vorgang auch super mit Lawinen vergleichen: Die Ansammlung von Schnee auf einem Hügel steht in Analogie zu den elektrischen Ladungen auf hohem Potential. (Metastabiler Zustand)
- Eine kleine Lichtmenge reicht zur Freisetzung der Ladungen genauso, wie eine kleine mechanische Störung ausreicht, um die Schneemasse freizusetzen.
- Wenn der Schnee sich abwärts bewegt „nimmt er immer mehr Schnee mit“ genauso, wie freigesetzte Ladungen weitere Ladungen freisetzen.
- Die Zeit, bis sich wieder Schnee auf dem Hügel gelagert hat, heißt nun Totzeit beim Detektor.
- Der Detektor gibt auch Pulse aus, wenn es Dunkel ist, z.B. weil er anderweitig Energie aufnimmt, oder erwärmt wird. Es gibt daher eine sog. Dunkelzählrate, z.B. wenn ich die Hand vor den Detektor halte, schau her. Dies ist vergleichbar mit einem spontanen kleineren Schneeabgang, der ganz zufällig passiert. So ist es mit den Dunkelzählereignissen des Detektors auch. Das ist einfach so, weil er elektronisch so gebaut wurde.
- Der Detektor kann also nichts anderes als klicken und er tut das ständig. Wir müssen also die Zählraten ansehen, das tun wir am Bildschirm mit Hilfe eines kleinen Programms, das einer meiner Kollegen aus Hannover entwickelt hat.
- Wir bringen nun die Detektoren genauso ins Experiment ein, dass sie unter einem Winkel von 3° auf das Experiment schauen.

2.4 Wirkung auf Lernende

Beschreibe einmal die Wirkung des Experiments auf dich. Welche der Komponenten oder Geräten interessieren / verwundern / irritieren dich am meisten?

3. Das Koinzidenzexperiment

3.1 Key Idea 4: Feinjustage quantenoptischer Experimente

- Der Kristall wird nun mittels einer Linse auf die aktive Fläche der Detektoren abgebildet. Dazu sind die Abstände gemäß der Abbildungsgleichung für dünne Linsen schon abgeschätzt und die Detektoren werden in den entsprechenden Entfernungen aufgestellt und auf dem optischen Tisch fixiert.
- Durch leichtes Drehen kann sichergestellt werden, dass der Detektor genau auf den Kristall sieht. Das sieht man, wenn die Zählraten stark ansteigen.
- Mittels der seitlich am sog. Tubus angebrachten Justierschrauben, kann die Linse im Inneren des Tubus noch in x- bzw. y-Richtung bewegt werden. Dreht man das Schraubchen jetzt gerade, so nehmen die Zählraten ab, d.h. das Experiment ist gerade gut justiert. Probier doch auch mal, durch leichtes Anfassen.
- Du siehst: Jetzt blickt der Detektor exakt in Richtung des Kristalls und sieht das Licht, das wir vorhin visualisiert hatten mit Hilfe des Beugungselements. Was wir aber mit unserem Auge nicht sehen konnten, sieht der Detektor.

3.2 Key Idea 5: Der Koinzidenzbegriff

- Sieh dir einmal nachfolgenden Zettel an. Der zeigt dir nun aufgetragen gegen die Zeitachse die Ereignisse der zwei Detektoren in einem hier durchgeführten Experiment. Was fällt dir auf, was sieht man? (=> Zufällige Verteilung der „Striche“, gleichzeitige Ereignisse)
- Sehr gut, diese gleichzeitigen Ereignisse sind etwas verwunderlich. Und sie tauchen sehr häufig auf, viel häufiger als man zunächst denken könnte.
- Vorneweg: Das gleichzeitige Eintreten eines Ereignisses nennt man Koinzidenz.
- Wir führen hier also Koinzidenzmessungen durch. Diese benötigen wir, weil wir die Zwillingsphotonen aus den zufälligen Ereignissen der Detektoren herausfiltern wollen. Klicken beide Detektoren gleichzeitig, so können wir davon ausgehen, dass wir ein Zwillingsphotonenpaar detektiert haben. Ansonsten können wir ja nicht sagen, dass der Klick durch das Photon bedingt war, weil die Detektoren ja ständig klicken. Es ist eben nicht jeder Klick ein Photon.
- Man spricht auch oft von angekündigten Einzelphotonenquellen: Ein Photon bzw. seine Detektion wird dann als Trigger für das andere Photon genutzt. So sind Koinzidenzexperimente die Grundlage für Einzelphotonenexperimente.

4. Das Experiment von Grangier, Roger und Aspect

4.1 Key Idea 6: Einzelne Photonen am Strahlteiler

- Der Strahlteiler besteht aus zwei verkitteten Prismen und funktioniert daher wie ein halbdurchlässiger Spiegel. Ein Teil des Lichts wird reflektiert, ein Teil wird transmittiert, d.h. durchgelassen.
- Die Frage ist nun, wie sich einzelne Photonen am Strahlteiler verhalten.
- Wir untersuchen dies nun, indem wir einen Strahlteiler in das Experiment auf einer Seite mit einbauen und einen dritten Detektor verwenden. Hier spielt nun der vorhergehende Aufbau eine Rolle. Durch die Koinzidenzmessung „filtern“ wir die Einzelphotonen aus dem Dunkelrauschen heraus. Wenn der Detektor A klickt, dann wissen wir im Fall einer Koinzidenz, dass auf der anderen Seite des Experiments mit einem einzelnen Photon experimentiert werden kann.
- Wir schauen nun die Zählraten genauer an. Jede dieser Zahlen bedeutet wieder: Anzahl der Ereignisse pro Sekunde.
- Wir beobachten nun eine Halbierung der Zählraten der Detektoren an den beiden Ausgängen des Strahlteilerwürfels. Dies ist ein Indiz dafür, dass einzelne Photonen auch entweder transmittiert oder reflektiert werden, sich aber nicht aufteilen. Es gibt aber auch Triplekoinzidenzen. Teilt sich das Photon manchmal, ist es teilbar, oder unteilbar?
- Wir brauchen nun ein objektives Kriterium, das die Frage klärt. Es lohnt sich daher die Zählraten im nächsten Schritt noch etwas genauer anzusehen.

4.2 Key Idea 7: Der α -Faktor

- Die Zahl der Ereignisse ergibt sich aus dem Produkt von Detektionswahrscheinlichkeit und der Zahl der Experimente pro Sekunde.
- Die Zahl der Experimente pro Sekunde entspricht bei uns der Zählrate des Triggerdetektors A.
- Nehmen wir einmal an, dass die Pulse an den Detektoren völlig zufällig und unabhängig voneinander sind, dann gilt $P_{ABC} = P_{AB} \cdot P_{AC}$. Wir bekommen am Bildschirm nur Zählraten N angezeigt und schreiben daher diese Gleichung so um, dass nur noch Zählraten auftauchen. Dazu multiplizieren wir auf beiden Seiten mit der Zahl der Experimente zum Quadrat, nämlich N_A^2 und erhalten: $N_{ABC} \cdot N_A = N_{AB} \cdot N_{AC}$
- Umstellen liefert nun: $\alpha = (N_{ABC} \cdot N_A) / (N_{AB} \cdot N_{AC}) = 1$ für stochastisch unabhängige Pulse.
- Für $\alpha = 0$ muss also $N_{ABC} = 0$ sein, weil die Zahl der Experimente auf jeden Fall ungleich 0 ist. Das würde bedeuten, dass das Photon entweder transmittiert oder reflektiert wurde, aber nicht geteilt wurde. Dies wäre dann ein Nachweis für die Existenz bzw. Unteilbarkeit des Photons. Man sagt, Quantenlicht ist an den Ausgängen des Strahlteilers antikorreliert, weil es weniger Triplekoinzidenzen gibt, als sie durch zufällige Koinzidenzen erwartet werden können.

5. Allgemeine Anmerkungen zum Konzept

- Was das Modul insgesamt verständlich?
- Gab es Stellen, an denen du nicht erkannt hast, was das Ziel der Inhalte und Erklärungen ist? D.h. ist der rote Faden beim Unterrichtsgang erkennbar?
- Findest du die durchgeführten Experimente übersichtlich und verständlich?
- Würdest du dich freuen solche Experimente im Physikunterricht häufiger zu sehen? Findest du Einzelphotonenexperimente interessant?

ANHANG C

Zu Kapitel 4

Die folgenden Unterlagen sind Kapitel 4 dieser Arbeit beigefügt:

- Entwicklungstest Distraktoren
- Testheft zur summativen Evaluation: Prä-, Post-, Follow-Up-Test sowie Smiley-Abfrage und Praxisfragebogen Lehrkräfte

Sehr geehrte Damen und Herren,

haben Sie zunächst einmal herzlichen Dank für Ihre Teilnahme an diesem Forschungsprojekt der Professur für Didaktik der Physik an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, das die Verbesserung des Unterrichts der Quantenphysik zum Ziel hat. Damit die Bearbeitung des folgenden Forschungsfragebogens anonym erfolgen kann, tragen Sie bitte in das Feld „Kennung“ unten die ersten zwei Buchstaben des Vornamens Ihres Vaters, gefolgt von den ersten zwei Buchstaben des Vornamens Ihrer Mutter ein (siehe Beispiel). Bei den Fragen handelt es sich um offene Fragen. Verbalisieren Sie bitte Ihre Überlegungen und vermeiden Sie Skizzen, sofern nicht explizit verlangt. Formulieren Sie ganze Sätze, keine Stichpunkte.

Beispiel: Vorname des Vaters ist Peter und Vorname der Mutter ist Gerlinde, dann ist Ihre Kennung PEGE.

Bitte tragen Sie nun Ihre Daten in die Felder nachfolgender Tabelle ein:

| | |
|--|--|
| Datum | |
| Geschlecht | <input type="checkbox"/> männlich <input type="checkbox"/> weiblich |
| Kennung (in Großbuchstaben) | <div style="border: 2px solid black; display: inline-block; padding: 5px;"> </div> |

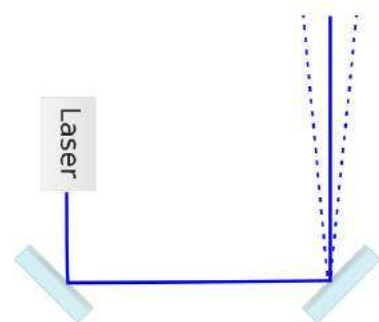
Wir bedanken uns ganz herzlich für Ihre Mitarbeit!

Philipp Bitzenbauer und Prof. Dr. Jan-Peter Meyn
Professur für Didaktik der Physik
 Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Frage 1. Beschreiben Sie die Funktionsweise von Strahlteilern detailliert.

Frage 2. Nennen Sie zwei typische Anwendungen des Strahlteilers.

Frage 3. Beschreiben Sie ausführlich, wie man mit Hilfe von Blenden und Umlenkspiegeln einen Laserstrahl entlang einer Lochrasterreihe ausrichten kann. Nehmen Sie dazu nachfolgende Skizze zur Hilfe.



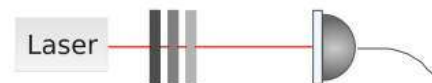
Frage 4. Welches Quantenobjekt sollte für Realexperimente im Klassenzimmer Ihrer Meinung nach eingesetzt werden? Begründen Sie Ihre Entscheidung!

Frage 5. Geben Sie eine schülernahe Begründung für die folgende Tatsache an: Unser Auge ist nicht als Detektor für einzelne Photonen geeignet.

Frage 6. Überlegen Sie sich Gründe für die Verwendung von Blenden für Einzelphotonendetektoren bei quantenoptischen Realexperimenten?

Frage 7. Die sog. parametrische Abwärtskonversion ist ein quantenelektrodynamischer Prozess. Fällt Licht eines Diodenlasers ($\lambda = 405\text{nm}$) auf einen nichtlinearen Kristall, so entstehen dabei Photonenpaare (zwei Photonen). Erläutern Sie (mit Begründung), was Sie über diese beiden Photonen in jedem Fall wissen.

Frage 8. Formulieren Sie eine schülernahe Begründung, weshalb mit nachfolgendem Versuchsaufbau keine Einzelphotonenexperimente durchführbar sind. (Gezeigt sind ein roter Laser, drei Neutraldichtefilter und ein Detektor.)



Frage 9. Beschreiben Sie in eigenen Worten (grob), wie ein Einzelphotonendetektor misst. Warum nennt man diese Detektoren gelegentlich auch Lawinendetektoren?

Frage 10. Bewerten Sie die folgende Schüleraussage: „Jeder Klick des Detektors ist genau ein Photon“.

Frage 11. Erläutern Sie, was Sie unter dem Begriff „Koinzidenz“ verstehen. Können Sie einen Grund finden, weshalb Koinzidenzmessungen Grundlage von Einzelphotonenexperimenten sind?

Frage 12. Eine Einzelphotonenquelle werde auf einen Einzelphotonendetektor gerichtet, der zunächst 100000 Counts/s zählt. Nun werde ein 50:50-Strahlteilerwürfel zwischen Einzelphotonenquelle und Detektor angebracht. Außerdem wird ein zweiter Detektor an den reflektierten Ausgang des Strahlteilers gestellt. Fertigen Sie eine kurze Skizze des grundlegenden Aufbaus an. Welche Zählraten erwarten Sie für die beiden Detektoren und welche Quanteneigenschaften kann man mit diesem Experiment zeigen?

Frage 13. Beschreiben Sie prägnant, was Sie unter den Begriffen „Interferenz“ und „Interferometer“ verstehen.

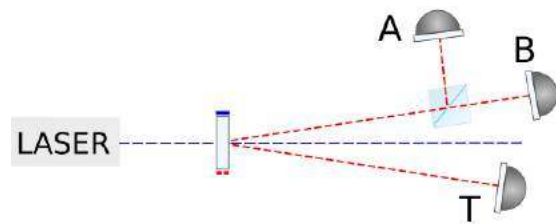
Frage 14. Was ist für Sie ein Photon?

Frage 15. Man kann heute Einzelphotonenexperimente im Prinzip bei Tageslicht und überall durchführen. Warum nur im Prinzip? Was benötigt man Ihrer Meinung nach in jedem Fall zur Durchführung von Experimenten mit einzelnen Photonen?

Frage 16. Die Korrelationsfunktion zweiter Ordnung an der Stelle $\tau = 0$ kann zur Klassifizierung von Licht genutzt werden. Sie ist definiert als

$$g^2(\tau) = \frac{\langle I_1(t)I_2(t + \tau) \rangle}{\langle I_1(t) \rangle \langle I_2(t + \tau) \rangle}.$$

Da die Intensität des Lichts proportional zur Ereigniswahrscheinlichkeit ist, kann man diesen Term für $g^2(0)$ durch Zählraten ausdrücken: $g^2(0) = \frac{N_{TAB} \cdot N_T}{N_{TA} \cdot N_{TB}}$, wobei N_{TAB} die Triple-Koinzidenzen zwischen den drei Detektoren, N_{TA}, N_{TB} die Double-Koinzidenzen zwischen je zwei Detektoren und N_T die Zählrate des Triggerdetektors T meint (vgl. nachfolgende Skizze). Mit Hilfe von $g^2(0)$ zieht man nun eine Grenze zwischen klassischer und Quantenwelt: $g^2(0) \geq 1$ für klassisches Licht und $g^2(0) < 1$ für Quantenlicht. Beschreiben Sie in eigenen Worten, was z.B. $g^2(0) = 5$ ausdrückt und was $g^2(0) = 0$ bedeutet.



Vielen Dank für die Teilnahme!



TESTHEFT SUMMATIVE EVALUATION UNTERRICHTSKONZEPT

Prä-, Post-, Follow-Up-Test & Smiley-Abfrage &
Praxisfragebogen Lehrkräfte

Bitzenbauer Philipp

Prätest

Liebe Schülerinnen und Schüler,

herzlichen Dank für die Teilnahme an diesem Forschungsprojekt der Professur für Didaktik der Physik an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, das die Verbesserung des Unterrichts der Quantenphysik zum Ziel hat. Zum Beantworten der Fragen kreuze bitte immer die zutreffende Antwortmöglichkeit so an: . Zur Korrektur fülle bitte das zu korrigierende Feld vollständig aus (■) und kreuze stattdessen das richtige Feld an. Damit die Bearbeitung des folgenden Forschungsfragebogens anonym erfolgen kann, trage bitte in das Feld „Kennung“ ein: In das erste Feld der Anfangsbuchstabe des Vornamens deines Vaters, in das zweite Feld den Anfangsbuchstaben des Vornamens deiner Mutter, in das dritte und vierte Feld den Tag deines Geburtstags. Beispiel:

- Vater heißt Thomas, Mutter heißt Simone und dein Geburtstag ist der 09.04.2002.
- Deine Kennung lautet dann: TS09

Bitte trage nun deine Daten in die Felder nachfolgender Tabelle ein:

| | |
|---|--|
| Name deiner Schule | |
| Datum | |
| Geschlecht | <input type="checkbox"/> männlich <input type="checkbox"/> weiblich |
| Kennung | <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> |
| Letzten beiden Zeugnisnoten Physik | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> |
| Interessiert an Quantenphysik? | <input type="checkbox"/> sehr <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> gar nicht |

Bemerkung: Deine Daten werden nur für Zwecke der Wissenschaft genutzt und gelöscht, sobald die Untersuchung abgeschlossen und die Auswertung beendet ist. Außerdem werden deine Daten nicht an andere Stellen übermittelt. Die Teilnahme ist freiwillig. Das Auslassen einzelner Fragen hat keine Folgen. Möchtest du nicht an dem Fragebogen teilnehmen, so ist dies dein gutes Recht und hat keinerlei Folgen.

Philipp Bitzenbauer und Prof. Dr. Jan-Peter Meyn
Professur für Didaktik der Physik
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

1. Wie schätzt du dich im Physikunterricht ein? Kreuze für dich zutreffend an: „1 = stimmt gar nicht“ bis „5 = stimmt völlig“!

| | | | | | | | | | | | |
|-----|---|--------------------------|---|--------------------------|---|--------------------------|---|--------------------------|---|--------------------------|---|
| 1.1 | Ich verstehe den Stoff in Physik sehr gut. | <input type="checkbox"/> | 1 | <input type="checkbox"/> | 2 | <input type="checkbox"/> | 3 | <input type="checkbox"/> | 4 | <input type="checkbox"/> | 5 |
| 1.2 | Ich behalte den Stoff in Physik sehr gut. | <input type="checkbox"/> | 1 | <input type="checkbox"/> | 2 | <input type="checkbox"/> | 3 | <input type="checkbox"/> | 4 | <input type="checkbox"/> | 5 |
| 1.3 | Ich beteilige mich am Physikunterricht sehr häufig. | <input type="checkbox"/> | 1 | <input type="checkbox"/> | 2 | <input type="checkbox"/> | 3 | <input type="checkbox"/> | 4 | <input type="checkbox"/> | 5 |
| 1.4 | Meine Leistungen in Physik sind nach meiner eigenen Einschätzung sehr gut. | <input type="checkbox"/> | 1 | <input type="checkbox"/> | 2 | <input type="checkbox"/> | 3 | <input type="checkbox"/> | 4 | <input type="checkbox"/> | 5 |
| 1.5 | Ich glaube, dass mich meine Mitschülerinnen / meine Mitschüler in Physik für sehr gut halten. | <input type="checkbox"/> | 1 | <input type="checkbox"/> | 2 | <input type="checkbox"/> | 3 | <input type="checkbox"/> | 4 | <input type="checkbox"/> | 5 |
| 1.6 | Ich glaube, dass meine Physiklehrerin / mein Physiklehrer meine Leistungen in Physik als sehr gut einschätzt. | <input type="checkbox"/> | 1 | <input type="checkbox"/> | 2 | <input type="checkbox"/> | 3 | <input type="checkbox"/> | 4 | <input type="checkbox"/> | 5 |
| 1.7 | Ich erwarte, dass in Zukunft meine Leistungen in Physik sehr gut sein werden. | <input type="checkbox"/> | 1 | <input type="checkbox"/> | 2 | <input type="checkbox"/> | 3 | <input type="checkbox"/> | 4 | <input type="checkbox"/> | 5 |
| 1.8 | Ich denke, ich bin für Physik begabt. | <input type="checkbox"/> | 1 | <input type="checkbox"/> | 2 | <input type="checkbox"/> | 3 | <input type="checkbox"/> | 4 | <input type="checkbox"/> | 5 |

2. Wie sehr interessiert dich Physik? Kreuze für dich zutreffend an: „1 = stimmt gar nicht“ bis „5 = stimmt völlig“!

| | | | | | | |
|-----|--|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 2.1 | Ich finde Physik spannend. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |
| 2.2 | Die Beschäftigung mit Physik macht mir Spaß. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |
| 2.3 | Mich interessieren physikalische Phänomene. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |
| 2.4 | Ich führe gerne physikalische Experimente durch. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |
| 2.5 | Es ist mir wichtig, etwas über Physik zu erfahren. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |
| 2.6 | Ich beschäftige mich auch in meiner Freizeit gerne mit Physik. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |

3. Was ist deine Meinung zum Experimentieren im Physikunterricht? Kreuze für dich zutreffend an: „1 = stimmt gar nicht“ bis „5 = stimmt völlig“!

| | | | | | | |
|-----|--|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 3.1 | Experimentieren gehört zu meinen Lieblingsbeschäftigungen im Physikunterricht. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |
| 3.2 | Ich finde es gut, wenn ein Experiment von mir wirkliches Nachdenken verlangt. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |
| 3.3 | Ich fühle mich zufrieden, wenn ich ein kompliziertes Problem endlich mit Hilfe eines Experiments verstehe. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |
| 3.4 | Ich finde es gut, wenn ich mich intensiv mit einem Experiment beschäftigen kann. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |
| 3.5 | Ich mag es, vorgegebene Experimente selbstständig durchzuführen. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |
| 3.6 | Ich finde es gut, wenn ich Experimente selbst ausdenken und durchführen kann. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |
| 3.7 | Ich mag Experimente, die der Lehrer vorführt und die ich beobachten kann. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |
| 3.8 | Mir macht es Spaß, selbstständig Experimente zu vorgegebenen Problemen zu suchen. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |
| 3.9 | Ich finde das Experimentieren meist interessant. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |

Forschungsfragen „Quantenoptik“

Von den drei Antwortmöglichkeiten ist immer genau eine Antwort richtig und inhaltlich vollständig. Bitte sei nicht enttäuscht, wenn du einige der Fragen noch nicht beantworten kannst. Viele der hier abgefragten Inhalte werden erst in der Unterrichtsreihe vermittelt! Kreuze bitte außerdem bei jeder Frage ehrlich an, wie sicher du dir dabei bist!

Frage 1. Ein Strahlteiler...

- ...wird im Michelson-Interferometer verwendet, weil man damit einen einfallenden Lichtstrahl in zwei Teilstrahlen trennen kann.
- ...besteht aus zwei verkitteten Prismen, wobei eines für den durchgelassenen und eines für den reflektierten Strahl verantwortlich ist.
- ...trennt einfallende Lichtstrahlen oder überlagert zwei Lichtstrahlen.

Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.

Frage 2. Wenn ein Laserstrahl auf den nichtlinearen Kristall fällt...

- ...kommt es zur Aussendung von Licht.
- ...kommt es zu einer Aufspaltung in zwei Teilstrahlen.
- ...kommt es zur Aussendung eines Beugungskegels mit Öffnungswinkel 3° .

Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.

Frage 3. Unser Auge ist als Detektor für einzelne Photonen nicht geeignet, weil...

- ...die Intensität des so auf das Auge fallenden Lichts zu gering ist.
- ...mit dem Auge nur bestimmte Wellenlängen wahrgenommen werden können, nicht aber die einzelner Photonen.
- ...die Photonen zu klein sind, um sie mit unseren Augen aufzulösen.

Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.

Frage 4. Wenn ein Elektron vom Energiezustand E_2 in den Energiezustand $E_1 < E_2$ übergeht, wird dabei Licht emittiert. Je größer die Energiedifferenz $\Delta E = E_2 - E_1$ ist, desto...

- ...mehr Photonen werden emittiert.
- ...größer ist die Wellenlänge des emittierten Lichts.
- ...kleiner ist die Wellenlänge des emittierten Lichts.

Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.

Frage 5. Im nichtlinearen Kristall werden aus dem einfallenden Laserstrahl Photonenpaare generiert. Diese Photonenpaare entstehen unter Beachtung der Energieerhaltung und jedes Photon hat daher...

- ...die halbe Wellenlänge des einfallenden Lichts des Lasers.
- ...die gleiche Wellenlänge, wie das einfallende Licht des Lasers.
- ...die doppelte Wellenlänge des einfallenden Lichts des Lasers.

Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.

Frage 6. Im Einzelphotonendetektor...

- ...wird die Zahl der registrierten Photonen innerhalb eines Zeitintervalls gezählt.
- ...lösen detektierte Energieportionen Elektronenlawinen aus.
- ...befinden sich Ladungen zunächst oben und werden durch eine einfallende Energiemenge nach unten bewegt.

Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.

Frage 7. Unter Interferenz versteht man...

- ...im Allgemeinen die Überlagerung von mindestens zwei elektromagnetischen Wellen.
- ...im Allgemeinen die Überlagerung von genau zwei Wellen. .
- ...im Allgemeinen die Überlagerung von mindestens zwei Wellen.

Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.

Frage 8. Führt man das Doppelspaltexperiment mit einzelnen Elektronen durch, so...

- ...sieht man das typische Interferenzmuster mit Minima und Maxima.
- ...sieht man zwei klar definierte Detektionsorte auf einem Schirm hinter dem Doppelspalt.
- ...sieht man zwei klar definierte Detektionsorte und ein Maximum nullter Ordnung auf einem Schirm hinter dem Doppelspalt.

Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.

Frage 9. Man verwendet Interferometer in Einzelphotonenexperimenten, um...

- ...zu zeigen, dass Licht nicht aus Photonen besteht.
- ...zu zeigen, dass Photonen kein Weg zugeordnet werden kann.
- ...zu zeigen, dass Photonen Quanteneigenschaften besitzen.

Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.

Frage 10. Wenn man die Einzelphotoneninterferenz im Michelson-Interferometer sieht, so muss sich das Photon im Interferometer am Strahlteiler aufgeteilt haben.

- Falsch, denn man sieht mit einzelnen Photonen keine Interferenzerscheinungen.
- Wahr, denn Licht wird am Strahlteiler auch in zwei Teilstrahlen aufgeteilt.
- Falsch, denn die Vorstellung des Photons als lokalisierbares Teilchen ist ungültig.

Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.

Frage 11. Laserlicht ist klassisches Licht, denn...

- ...für Laserlicht gilt $\alpha > 1$.
- ...für Laserlicht gilt $\alpha < 1$.
- ...für Laserlicht gilt $\alpha = 1$.

Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.

Frage 12. Für jedes Einzelphotonenexperiment benötigt man...

- ...zwei Einzelphotonendetektoren.
- ...mindestens zwei Einzelphotonendetektoren.
- ...mindestens drei Einzelphotonendetektoren.

Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.

Frage 13. Photonen sind...

- ...kugelförmige Teilchen, die manchmal wellenartiges Verhalten zeigen.
- ...Bestandteile des Lichts, die von einer Welle umgeben sind, die für die Interferenz verantwortlich ist.
- ...Energieportionen.

Sehr sicher.

Sicher.

Unentschlossen.

Unsicher.

Geraten.

Posttest

Liebe Schülerinnen und Schüler,

herzlichen Dank für die Teilnahme an diesem Forschungsprojekt der Professur für Didaktik der Physik an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, das die Verbesserung des Unterrichts der Quantenphysik zum Ziel hat. Zum Beantworten der Fragen kreuze bitte immer die zutreffende Antwortmöglichkeit so an: . Zur Korrektur fülle bitte das zu korrigierende Feld vollständig aus (■) und kreuze stattdessen das richtige Feld an. Damit die Bearbeitung des folgenden Forschungsfragebogens anonym erfolgen kann, trage bitte in das Feld „Kennung“ ein: In das erste Feld der Anfangsbuchstabe des Vornamens deines Vaters, in das zweite Feld den Anfangsbuchstaben des Vornamens deiner Mutter, in das dritte und vierte Feld den Tag deines Geburtstags. Beispiel:

- Vater heißt Thomas, Mutter heißt Simone und dein Geburtstag ist der 09.04.2002.
- Deine Kennung lautet dann: TS09

Bitte trage nun deine Daten in die Felder nachfolgender Tabelle ein:

| | |
|---|--|
| Name deiner Schule | |
| Datum | |
| Geschlecht | <input type="checkbox"/> männlich <input type="checkbox"/> weiblich |
| Kennung | <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> |
| Letzten beiden Zeugnisnoten Physik | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> |
| Interessiert an Quantenphysik? | <input type="checkbox"/> sehr <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> gar nicht |

Bemerkung: Deine Daten werden nur für Zwecke der Wissenschaft genutzt und gelöscht, sobald die Untersuchung abgeschlossen und die Auswertung beendet ist. Außerdem werden deine Daten nicht an andere Stellen übermittelt. Die Teilnahme ist freiwillig. Das Auslassen einzelner Fragen hat keine Folgen. Möchtest du nicht an dem Fragebogen teilnehmen, so ist dies dein gutes Recht und hat keinerlei Folgen.

Philipp Bitzenbauer und Prof. Dr. Jan-Peter Meyn
Professur für Didaktik der Physik
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

1. Wie sehr interessiert dich Physik? Kreuze für dich zutreffend an: „1 = stimmt gar nicht“ bis „5 = stimmt völlig“!

| | | | | | | |
|-----|--|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 2.1 | Ich finde Physik spannend. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |
| 2.2 | Die Beschäftigung mit Physik macht mir Spaß. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |
| 2.3 | Mich interessieren physikalische Phänomene. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |
| 2.4 | Ich führe gerne physikalische Experimente durch. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |
| 2.5 | Es ist mir wichtig, etwas über Physik zu erfahren. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |
| 2.6 | Ich beschäftige mich auch in meiner Freizeit gerne mit Physik. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |

3. Was ist deine Meinung zum Experimentieren im Physikunterricht? Kreuze für dich zutreffend an: „1 = stimmt gar nicht“ bis „5 = stimmt völlig“!

| | | | | | | |
|-----|--|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 3.1 | Experimentieren gehört zu meinen Lieblingsbeschäftigungen im Physikunterricht. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |
| 3.2 | Ich finde es gut, wenn ein Experiment von mir wirkliches Nachdenken verlangt. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |
| 3.3 | Ich fühle mich zufrieden, wenn ich ein kompliziertes Problem endlich mit Hilfe eines Experiments verstehe. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |
| 3.4 | Ich finde es gut, wenn ich mich intensiv mit einem Experiment beschäftigen kann. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |
| 3.5 | Ich mag es, vorgegebene Experimente selbstständig durchzuführen. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |
| 3.6 | Ich finde es gut, wenn ich Experimente selbst ausdenken und durchführen kann. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |
| 3.7 | Ich mag Experimente, die der Lehrer vorführt und die ich beobachten kann. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |
| 3.8 | Mir macht es Spaß, selbstständig Experimente zu vorgegebenen Problemen zu suchen. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |
| 3.9 | Ich finde das Experimentieren meist interessant. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |

4. Mit den folgenden Fragen möchten wir gerne deine Meinung zu den vergangenen sechs Physikstunden (bzw. 3 Doppelstunden) im Rahmen der Forschungsstudie erfahren. Kreuze für dich zutreffend an: „1 = stimmt gar nicht“ bis „5 = stimmt völlig“!

| | | | | | | |
|-----|---|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 4.1 | Die zurückliegenden Physikstunden waren anders als sonst. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |
| 4.2 | Die zurückliegenden Physikstunden fand ich sehr interessant. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |
| 4.3 | Die Experimente der vergangenen Stunden haben mir Spaß gemacht. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |
| 4.4 | In den vergangenen Stunden ist die Zeit sehr schnell vergangen. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |
| 4.5 | In den zurückliegenden Stunden habe ich mich beim Experimentieren wohl gefühlt. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |
| 4.6 | Das Thema der zurückliegenden Stunden fand ich sehr interessant. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |
| 4.7 | Was ich in den vergangenen Stunden erfahren habe, bringt mir etwas. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |
| 4.8 | Das Thema der vergangenen Stunden erscheint mir persönlich wichtig. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |
| 4.9 | In den zurückliegenden Stunden habe ich richtig Spaß am Experimentieren bekommen. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |

Forschungsfragen „Quantenoptik“

Von den drei Antwortmöglichkeiten ist immer genau eine Antwort richtig und inhaltlich vollständig. Lies daher die Antwortmöglichkeiten genau und entscheide dich für diejenige, die nicht nur wahre Teilaspekte anspricht, sondern vollständig ist. Kreuze bitte außerdem bei jeder Frage ehrlich an, wie sicher du dir bist!

Frage 1. Ein Strahlteiler...

- ...wird im Michelson-Interferometer verwendet, weil man damit einen einfallenden Lichtstrahl in zwei Teilstrahlen trennen kann.
- ...besteht aus zwei verkitteten Prismen, wobei eines für den durchgelassenen und eines für den reflektierten Strahl verantwortlich ist.
- ...trennt einfallende Lichtstrahlen oder überlagert zwei Lichtstrahlen.

Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.

Frage 2. Wenn ein Laserstrahl auf den nichtlinearen Kristall fällt...

- ...kommt es zur Aussendung von Licht.
- ...kommt es zu einer Aufspaltung in zwei Teilstrahlen.
- ...kommt es zur Aussendung eines Beugungskegels mit Öffnungswinkel 3° .

Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.

Frage 3. Unser Auge ist als Detektor für einzelne Photonen nicht geeignet, weil...

- ...die Intensität des so auf das Auge fallenden Lichts zu gering ist.
- ...mit dem Auge nur bestimmte Wellenlängen wahrgenommen werden können, nicht aber die einzelner Photonen.
- ...die Photonen zu klein sind, um sie mit unseren Augen aufzulösen.

Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.

Frage 4. Wenn ein Elektron vom Energiezustand E_2 in den Energiezustand $E_1 < E_2$ übergeht, wird dabei Licht emittiert. Je größer die Energiedifferenz $\Delta E = E_2 - E_1$ ist, desto...

- ...mehr Photonen werden emittiert.
- ...größer ist die Wellenlänge des emittierten Lichts.
- ...kleiner ist die Wellenlänge des emittierten Lichts.

Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.

Frage 5. Im nichtlinearen Kristall werden aus dem einfallenden Laserstrahl Photonenpaare generiert. Diese Photonenpaare entstehen unter Beachtung der Energieerhaltung und jedes Photon hat daher...

- ...die halbe Wellenlänge des einfallenden Lichts des Lasers.
- ...die gleiche Wellenlänge, wie das einfallende Licht des Lasers.
- ...die doppelte Wellenlänge des einfallenden Lichts des Lasers.

Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.

Frage 6. Im Einzelphotonendetektor...

- ...wird die Zahl der registrierten Photonen innerhalb eines Zeitintervalls gezählt.
- ...lösen detektierte Energieportionen Elektronenlawinen aus.
- ...befinden sich Ladungen zunächst oben und werden durch eine einfallende Energiemenge nach unten bewegt.

Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.

Frage 7. Unter Interferenz versteht man...

- ...im Allgemeinen die Überlagerung von mindestens zwei elektromagnetischen Wellen.
- ...im Allgemeinen die Überlagerung von genau zwei Wellen. .
- ...im Allgemeinen die Überlagerung von mindestens zwei Wellen.

Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.

Frage 8. Führt man das Doppelspaltexperiment mit einzelnen Elektronen durch, so...

- ...sieht man das typische Interferenzmuster mit Minima und Maxima.
- ...sieht man zwei klar definierte Detektionsorte auf einem Schirm hinter dem Doppelspalt.
- ...sieht man zwei klar definierte Detektionsorte und ein Maximum nullter Ordnung auf einem Schirm hinter dem Doppelspalt.

Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.

Frage 9. Man verwendet Interferometer in Einzelphotonenexperimenten, um...

- ...zu zeigen, dass Licht nicht aus Photonen besteht.
- ...zu zeigen, dass Photonen kein Weg zugeordnet werden kann.
- ...zu zeigen, dass Photonen Quanteneigenschaften besitzen.

Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.

Frage 10. Wenn man die Einzelphotoneninterferenz im Michelson-Interferometer sieht, so muss sich das Photon im Interferometer am Strahlteiler aufgeteilt haben.

- Falsch, denn man sieht mit einzelnen Photonen keine Interferenzerscheinungen.
- Wahr, denn Licht wird am Strahlteiler auch in zwei Teilstrahlen aufgeteilt.
- Falsch, denn die Vorstellung des Photons als lokalisierbares Teilchen ist ungültig.

Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.

Frage 11. Laserlicht ist klassisches Licht, denn...

- ...für Laserlicht gilt $\alpha > 1$.
- ...für Laserlicht gilt $\alpha < 1$.
- ...für Laserlicht gilt $\alpha = 1$.

Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.

Frage 12. Für jedes Einzelphotonenexperiment benötigt man...

- ...zwei Einzelphotonendetektoren.
- ...mindestens zwei Einzelphotonendetektoren.
- ...mindestens drei Einzelphotonendetektoren.

Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.

Frage 13. Photonen sind...

- ...kugelförmige Teilchen, die manchmal wellenartiges Verhalten zeigen.
- ...Bestandteile des Lichts, die von einer Welle umgeben sind, die für die Interferenz verantwortlich ist.
- ...Energieportionen.

Sehr sicher.

Sicher.

Unentschlossen.

Unsicher.

Geraten.

Follow-Up-Test

Liebe Schülerinnen und Schüler,

herzlichen Dank für die Teilnahme an diesem Forschungsprojekt der Professur für Didaktik der Physik an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, das die Verbesserung des Unterrichts der Quantenphysik zum Ziel hat. Zum Beantworten der Fragen kreuze bitte immer die zutreffende Antwortmöglichkeit so an: . Zur Korrektur fülle bitte das zu korrigierende Feld vollständig aus (■) und kreuze stattdessen das richtige Feld an. Damit die Bearbeitung des folgenden Forschungsfragebogens anonym erfolgen kann, trage bitte in das Feld „Kennung“ ein: In das erste Feld der Anfangsbuchstabe des Vornamens deines Vaters, in das zweite Feld den Anfangsbuchstaben des Vornamens deiner Mutter, in das dritte und vierte Feld den Tag deines Geburtstags. Beispiel:

- Vater heißt Thomas, Mutter heißt Simone und dein Geburtstag ist der 09.04.2002.
- Deine Kennung lautet dann: TS09

Bitte trage nun deine Daten in die Felder nachfolgender Tabelle ein:

| | |
|---|--|
| Name deiner Schule | |
| Datum | |
| Geschlecht | <input type="checkbox"/> männlich <input type="checkbox"/> weiblich |
| Kennung | <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> |
| Letzten beiden Zeugnisnoten Physik | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> |
| Interessiert an Quantenphysik? | <input type="checkbox"/> sehr <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> gar nicht |

Bemerkung: Deine Daten werden nur für Zwecke der Wissenschaft genutzt und gelöscht, sobald die Untersuchung abgeschlossen und die Auswertung beendet ist. Außerdem werden deine Daten nicht an andere Stellen übermittelt. Die Teilnahme ist freiwillig. Das Auslassen einzelner Fragen hat keine Folgen. Möchtest du nicht an dem Fragebogen teilnehmen, so ist dies dein gutes Recht und hat keinerlei Folgen.

Philipp Bitzenbauer und Prof. Dr. Jan-Peter Meyn
Professur für Didaktik der Physik
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Forschungsfragen „Quantenoptik“

Von den drei Antwortmöglichkeiten ist immer genau eine Antwort richtig und inhaltlich vollständig. Kreuze bitte außerdem bei jeder Frage ehrlich an, wie sicher du dir bist!

Frage 1. Ein Strahlteiler...

- ...wird im Michelson-Interferometer verwendet, weil man damit einen einfallenden Lichtstrahl in zwei Teilstrahlen trennen kann.
- ...besteht aus zwei verkitteten Prismen, wobei eines für den durchgelassenen und eines für den reflektierten Strahl verantwortlich ist.
- ...trennt einfallende Lichtstrahlen oder überlagert zwei Lichtstrahlen.

Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.

Frage 2. Wenn ein Laserstrahl auf den nichtlinearen Kristall fällt...

- ...kommt es zur Aussendung von Licht.
- ...kommt es zu einer Aufspaltung in zwei Teilstrahlen.
- ...kommt es zur Aussendung eines Beugungskegels mit Öffnungswinkel 3° .

Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.

Frage 3. Unser Auge ist als Detektor für einzelne Photonen nicht geeignet, weil...

- ...die Intensität des so auf das Auge fallenden Lichts zu gering ist.
- ...mit dem Auge nur bestimmte Wellenlängen wahrgenommen werden können, nicht aber die einzelner Photonen.
- ...die Photonen zu klein sind, um sie mit unseren Augen aufzulösen.

Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.

Frage 4. Wenn ein Elektron vom Energiezustand E_2 in den Energiezustand $E_1 < E_2$ übergeht, wird dabei Licht emittiert. Je größer die Energiedifferenz $\Delta E = E_2 - E_1$ ist, desto...

- ...mehr Photonen werden emittiert.
- ...größer ist die Wellenlänge des emittierten Lichts.
- ...kleiner ist die Wellenlänge des emittierten Lichts.

Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.

Frage 5. Im nichtlinearen Kristall werden aus dem einfallenden Laserstrahl Photonenpaare generiert. Diese Photonenpaare entstehen unter Beachtung der Energieerhaltung und jedes Photon hat daher...

- ...die halbe Wellenlänge des einfallenden Lichts des Lasers.
- ...die gleiche Wellenlänge, wie das einfallende Licht des Lasers.
- ...die doppelte Wellenlänge des einfallenden Lichts des Lasers.
- Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.
-

Frage 6. Im Einzelphotonendetektor...

- ...wird die Zahl der registrierten Photonen innerhalb eines Zeitintervalls gezählt.
- ...lösen detektierte Energieportionen Elektronenlawinen aus.
- ...befinden sich Ladungen zunächst oben und werden durch eine einfallende Energiemenge nach unten bewegt.
- Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.
-

Frage 7. Unter Interferenz versteht man...

- ...im Allgemeinen die Überlagerung von mindestens zwei elektromagnetischen Wellen.
- ...im Allgemeinen die Überlagerung von genau zwei Wellen. .
- ...im Allgemeinen die Überlagerung von mindestens zwei Wellen.
- Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.
-

Frage 8. Führt man das Doppelspaltexperiment mit einzelnen Elektronen durch, so...

- ...sieht man das typische Interferenzmuster mit Minima und Maxima.
- ...sieht man zwei klar definierte Detektionsorte auf einem Schirm hinter dem Doppelspalt.
- ...sieht man zwei klar definierte Detektionsorte und ein Maximum nullter Ordnung auf einem Schirm hinter dem Doppelspalt.
- Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.
-

Frage 9. Man verwendet Interferometer in Einzelphotonenexperimenten, um...

- ...zu zeigen, dass Licht nicht aus Photonen besteht.
- ...zu zeigen, dass Photonen kein Weg zugeordnet werden kann.
- ...zu zeigen, dass Photonen Quanteneigenschaften besitzen.

Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.

Frage 10. Wenn man die Einzelphotoneninterferenz im Michelson-Interferometer sieht, so muss sich das Photon im Interferometer am Strahlteiler aufgeteilt haben.

- Falsch, denn man sieht mit einzelnen Photonen keine Interferenzerscheinungen.
- Wahr, denn Licht wird am Strahlteiler auch in zwei Teilstrahlen aufgeteilt.
- Falsch, denn die Vorstellung des Photons als lokalisierbares Teilchen ist ungültig.

Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.

Frage 11. Laserlicht ist klassisches Licht, denn...

- ...für Laserlicht gilt $\alpha > 1$.
- ...für Laserlicht gilt $\alpha < 1$.
- ...für Laserlicht gilt $\alpha = 1$.

Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.

Frage 12. Für jedes Einzelphotonenexperiment benötigt man...

- ...zwei Einzelphotonendetektoren.
- ...mindestens zwei Einzelphotonendetektoren.
- ...mindestens drei Einzelphotonendetektoren.

Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.

Frage 13. Photonen sind...

...kugelförmige Teilchen, die manchmal wellenartiges Verhalten zeigen.

...Bestandteile des Lichts, die von einer Welle umgeben sind, die für die Interferenz verantwortlich ist.

...Energieportionen.

Sehr sicher.

Sicher.

Unentschlossen.

Unsicher.

Geraten.

Wie findest du...?

Kreuze nachfolgend jeweils an, wie interessant du den jeweiligen Abschnitt des Unterrichtsgangs findest. Setze jeweils dein Kreuz an der richtigen Stelle mit folgender Bedeutung:



Diesen Abschnitt finde ich interessant und spannend.






Diesen Abschnitt finde ich einigermaßen interessant.



Diesen Abschnitt finde ich nicht interessant.

Deine Beurteilung:

| |  |  |  |
|--|--|---|--|
| Detektion von Licht & Funktionsweise Einzelphotonendetektoren | | | |
| Einzelphotonenquelle & Koinzidenzmessung | | | |
| Unteilbarkeit am Strahlteilerwürfel | | | |
| Einzelphotoneninterferenz | | | |

Fragebogen „Praxiserfahrungen“

Liebe Kolleginnen und Kollegen,

haben Sie vielen Dank, dass Sie an der Evaluation des Quantenoptik-Konzepts teilgenommen haben. Ich bitte Sie, die nachfolgenden Fragen zu beantworten, damit wir im Nachgang zur Durchführung der Studie mögliche Änderungen des Unterrichtskonzepts vornehmen können. Dabei soll vornehmlich die Praxistauglichkeit der zur Verfügung gestellten Materialien festgestellt werden. Außerdem sollen mögliche Schwachstellen und Probleme zusammengetragen werden, um daran anschließend das Unterrichtsmaterial zu verbessern, bevor es letztlich frei zugänglich gemacht wird, sodass es dann überall genutzt werden kann.

Bemerkung: Ihre Daten werden nur für Zwecke der Wissenschaft genutzt und gelöscht, sobald die Untersuchung abgeschlossen und die Auswertung beendet ist. Außerdem werden Ihre Daten nicht an andere Stellen übermittelt. Die Teilnahme ist freiwillig. Das Auslassen einzelner Fragen hat keine Folgen. Möchten Sie nicht teilnehmen, so ist dies dein gutes Recht und hat keinerlei Folgen.

Philipp Bitzenbauer und Prof. Dr. Jan-Peter Meyn
Professur für Didaktik der Physik
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Allgemeine Fragen

1. Erläutern Sie, warum Sie sich dazu entschieden haben, an der Studie teilzunehmen.
2. Welche Themen der Quantenphysik erachteten Sie vor der Teilnahme an der Studie für unverzichtbar im Physikunterricht?
3. Welche Themen der Quantenphysik erachteten Sie nach der Teilnahme an der Studie für unverzichtbar im Physikunterricht?

Gesamteinschätzung des Unterrichtskonzepts

Kreuze Sie jeweils an, inwiefern Sie den folgenden Aussagen im Bezug auf das Unterrichtskonzept zustimmen würden:

„1 = stimmt gar nicht“ bis „5 = stimmt völlig“!

Das Unterrichtskonzept...

- | | | | | | | | | | | |
|---|--------------------------|---|--------------------------|---|--------------------------|---|--------------------------|---|--------------------------|---|
| 4. ...wird von den Schülerinnen und Schülern akzeptiert. | <input type="checkbox"/> | 1 | <input type="checkbox"/> | 2 | <input type="checkbox"/> | 3 | <input type="checkbox"/> | 4 | <input type="checkbox"/> | 5 |
| 5. ...vermittelt zentrale Aspekte anschaulich und verständlich. | <input type="checkbox"/> | 1 | <input type="checkbox"/> | 2 | <input type="checkbox"/> | 3 | <input type="checkbox"/> | 4 | <input type="checkbox"/> | 5 |
| 6. ...setzt auf anknüpfungsfähige Vorstellungen. | <input type="checkbox"/> | 1 | <input type="checkbox"/> | 2 | <input type="checkbox"/> | 3 | <input type="checkbox"/> | 4 | <input type="checkbox"/> | 5 |
| 7. ...ist in der Lage den Schülerinnen und Schülern eine adäquate Vorstellung über moderne Naturwissenschaft zu vermitteln. | <input type="checkbox"/> | 1 | <input type="checkbox"/> | 2 | <input type="checkbox"/> | 3 | <input type="checkbox"/> | 4 | <input type="checkbox"/> | 5 |
| 8. ...erreicht bei den Schülerinnen und Schülern ein gutes konzeptionelles Verständnis über naturwissenschaftliche Mess- und Arbeitsmethoden. | <input type="checkbox"/> | 1 | <input type="checkbox"/> | 2 | <input type="checkbox"/> | 3 | <input type="checkbox"/> | 4 | <input type="checkbox"/> | 5 |
-

Bewertung der Arbeitsblätter und ihres Einsatzes

Kreuzen Sie jeweils an, inwiefern Sie den folgenden Aussagen im Bezug auf das Unterrichtskonzept zustimmen würden:

„1 = stimmt gar nicht“ bis „5 = stimmt völlig“!

| | | | | | |
|---|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 9. Die Arbeitsblätter sind gut strukturiert. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |
| 10. Die Arbeitsblätter sind ansprechend gestaltet. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |
| 11. Die Arbeitsblätter leiten sinnvoll durch die Inhalte des Konzepts. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |
| 12. Die Aufgabenstellungen der Arbeitsblätter sind klar verständlich formuliert. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |
| 13. Die Arbeitsblätter regen sinnvolle Unterrichtsphasen an, in denen die SuS eigenständig arbeiten können. [Im eignen Unterricht, können die SuS z.B. im Computerraum auch alle IBEs eigenständig durchführen und daran lernen] | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |
| 14. Die Arbeitsblätter bilden eine ausreichende Sicherung der vermittelten Unterrichtsinhalte. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |

Stärken und Schwächen des Konzepts

15. Worin liegen Ihrer Meinung nach die größten Stärken des Konzepts und warum?

16. Worin liegen Ihrer Meinung nach die größten Schwächen des Konzepts und warum?

17. An welchen Stellen während der drei Doppelstunden hatten Sie das Gefühl, dass einige Ihrer Schülerinnen und Schüler überfordert waren? Haben Sie Ideen, wie man das besser machen kann?

Der Einsatz des Konzepts und der Materialien im zukünftigen Unterricht

Kreuze Sie jeweils an, inwiefern Sie den folgenden Aussagen im Bezug auf das Unterrichtskonzept zustimmen würden:

„1 = stimmt gar nicht“ bis „5 = stimmt völlig“!

-
- | | | | | | |
|--|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 18. Ich werde in Zukunft einen Teil des Quantenphysikunterrichts wieder mittels des Unterrichtskonzepts gestalten. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |
|--|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
-
- | | | | | | |
|--|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 19. Ich würde die entsprechenden Realexperimente von der Universität ausleihen, wenn das möglich wäre. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |
|--|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
-
- | | | | | | |
|---|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 20. Ich werde das Unterrichtskonzept an Kollegen weiterempfehlen. | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 |
|---|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
-

Hier haben Sie noch Platz für weitere Anmerkungen oder Verbesserungsvorschläge:

ANHANG D

Zu Kapitel 5

Die folgenden Unterlagen sind Kapitel 5 dieser Arbeit beigefügt:

- Leitfaden zur Durchführung der Laute Denken Studie
- Die vorgenommenen Kodierungen finden sich auf der Daten-CD

Leitfaden „Lautes Denken“

- Vielen Dank, dass Sie sich bereit erklärt haben, am Interview teilzunehmen und mich damit in meinem Promotionsprojekt unterstützen.
- Alle Informationen, die ich heute von Ihnen bekomme, dienen ausschließlich Forschungszwecken und werden streng vertraulich behandelt. Insbesondere werde nur ich diese zu Gehör bekommen bzw. anonymisiert zu Forschungszwecken verwenden. Die Daten werden nach Abschluss des Projekts gelöscht.
- Ich werde Ihnen gleich eine Reihe von Fragebogen-Items vorlegen. Ich möchte gern etwas darüber erfahren, was Sie unter den Items verstehen und ob sie für Sie überhaupt verständlich sind.
- Instruktion zum Lauten Denken nach Mackensen-Friedrichs, 2004:
 - ⇒ Lesen Sie bitte zunächst jedes Item laut vor.
 - ⇒ Fassen Sie anschließend das Item mit eigenen Worte zusammen und sagen Sie laut, was Sie darunter verstehen. Erzählen Sie bitte so lange, bis alle im Item aufgeworfenen Fragestellungen und Antwortmöglichkeiten in Ihren Aufgaben vollständig geklärt sind.
 - ⇒ Lesen und sprechen Sie im Idealfall bitte ohne Unterbrechungen, verbalisieren Sie also möglichst pausenlos Ihre Gedanken zu den gerade bearbeiteten Items.
 - ⇒ Ordnen Sie Ihre Gedanken nicht vor dem Sprechen. Stellen Sie sich vor, sie Seien ganz alleine in dem Raum.
 - ⇒ Das laute Sprechen/Denken ist vielleicht zunächst ungewohnt. Kein Problem – Ich werde Sie einfach immer wieder dazu auffordern, Ihre Gedanken zu äußern und Sie so unterstützen.
 - ⇒ Führen Sie Ihre Gedanken, dann auf eine Entscheidung für eine richtige Antwort und kreuzen Sie diese an. Begründen Sie dann jeweils Ihre Entscheidung, wenn das nicht schon geschehen ist.
 - ⇒ Diesen Vierschritt „Lautes Vorlesen – Zusammenfassen – Antwortfindung – Begründung“ lege ich als Gedächtnisstütze neben den Fragebogen.
- Wenn Sie über Begriffe stolpern, die Sie nicht kennen, dann teilen Sie mir dies bitte mit. Wir wollen die Items nämlich möglichst einfach gestalten.
- Am Ende werde ich Sie jeweils fragen, wie Sie sich bez. aller Items einschätzen würden und welche Items sie als unauthentisch bzw. sehr scher/leicht wahrgenommen haben.

Leitfaden für Retrospektive

Allgemeine Fragen zum Gesamteindruck

Wie bewerten Sie die Passung von Arbeitsmaterial und der im Unterricht vermittelten Inhalte mit den im Test geprüften Inhalten?

Zielgruppengerechte Gestaltung

- Welche Probleme hatten Sie bei der Lösung der Aufgabe(n)? Bei welchen Aufgaben?
- Fanden Sie die Aufgaben anspruchsvoll?

Fragen zur Verständlichkeit

- Wie schätzen Sie die Verständlichkeit der Aufgabenstellungen ein?
- Gab es Stellen, wo Sie nicht wussten, was im Test von Ihnen erwartet wurde?
- Hätten Sie gern mehr erklärende Hilfen gehabt? Und falls ja, an welchen Stellen?

ANHANG E

Zu Kapitel 6

Die folgenden Unterlagen sind Kapitel 6 dieser Arbeit beigefügt:

- Anschreiben Expertenrating
- Fragebogen Expertenrating

Erlangen, den 08. Juli 2019

Expertenbefragung zur Validierung eines Testinstruments zur Quantenoptik

obwohl FP9 erst 2021 starten wird und wir bisher noch in den Vorbereitungen stecken, hätte ich doch bereits ein Anliegen, mit dem ich mich hiermit an unsere Community wende.

Realexperimente mit einzelnen Photonen wurden an der Physikdidaktik der Universität in Erlangen entwickelt und für die gymn. Oberstufe didaktisch aufbereitet. Die Elementarisierungen zur Funktionsweise der Einzelphotonendetektoren, zum Koinzidenzbegriff oder zum Antikorrelationsfaktor $g^2(0)$ wurden in Akzeptanzbefragungen empirisch untersucht und in ein Unterrichtskonzept eingebettet. Der hohe technische Aufwand, der mit den Experimenten verbunden ist, kann mit Hilfe interaktiver Bildschirmexperimente (IBEs) umgangen werden. In einer Vergleichsstudie soll nun gezeigt werden, wie Quantenoptik in einem einführenden Unterrichtskonzept zur Quantenphysik an der Schule unterrichtet werden kann und es soll ferner der Frage nachgegangen werden, inwiefern sich der technische Mehraufwand bei Durchführung der Realexperimente gegenüber der Verwendung von IBEs lohnt oder nicht.

Im Zuge der Pilotierung des entwickelten Testinstruments würden wir nun um Unterstützung in Form der Teilnahme an diesem Expertenrating bitten. Dabei geht es insbesondere um eine inhaltliche Validierung des Testinstruments. Helfen Sie uns und bewerten Sie dazu bitte die formulierten Testitems (siehe beigelegtes Testinstrument) gemäß vorgegebener Fragen auf einer Ratingskala. Mit dem Testinstrument ist nicht die Erwartung verbunden die Quantenphysik zu testen, sondern die Lernwirksamkeit des Konzepts zu evaluieren, sodass das Instrument eng auf die Intervention abgestimmt ist. Um die Passung zum Unterrichtskonzept besser einschätzen zu können, haben wir die Arbeitsblätter zum Unterrichtskonzept (Version für Unterrichtsszenario mit Realexperimenten) mit Lösungsvorschlägen beigelegt. Den ausgefüllten Ratingbogen können Sie in dem beiliegenden und bereits frankierten Umschlag an uns zurück senden.

Selbstverständlich werden wir Ihre Angaben vertraulich und nur zu Forschungszwecken verwenden! Insbesondere werden die Daten datenschutzkonform entsorgt, sobald diese ausgewertet sind.

Ich danke Ihnen vielmals für Ihre Unterstützung und verbleibe mit freundlichen Grüßen,

Philipp Bitzenbauer

Expertenrating zum Testinstrument

Setzen Sie zur Einordnung Ihrer Zustimmung einen Haken an der richtigen Stelle:

**1 = trifft gar nicht zu | 2 = trifft wenig zu | 3 = trifft teils, teils zu |
4 = trifft ziemlich zu | 5 = trifft völlig zu.**

Außerdem ermöglichen Ihnen freie Textfelder allgemeine Kommentare oder mögliche Begründungen zu Ihren Entscheidungen, die uns bei der Optimierung der Materialien und des Testinstruments sehr weiterhelfen!

Nachfolgend finden Sie die jeweiligen Testitems mit den dazu zu bewertenden Aussagen dargestellt.

a) Zu Item Nr. 1

Das Item:

Frage 1. Ein Strahlteiler...

- ...wird im Michelson-Interferometer verwendet, weil man damit einen einfallenden Lichtstrahl in zwei Teilstrahlen trennen kann.
- ...besteht aus zwei verkitteten Prismen, wobei eines für den durchgelassenen und eines für den reflektierten Strahl verantwortlich ist.
- ...trennt einfallende Lichtstrahlen oder überlagert zwei Lichtstrahlen.

Sehr sicher.

Sicher.

Unentschlossen.

Unsicher.

Geraten.

Ihre Bewertung:

| Aussage | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|--|---|---|---|---|
| Der Inhalt dieses Items ist relevant für den Unterricht der Quantenoptik. | | | | | |
| Dieses Item prüft einen entscheidenden Inhaltsaspekt des Unterrichtskonzepts. | | | | | |
| Die Distraktoren sind authentisch; könnten also von jemandem, der die Antwort nicht sicher kennt, als wahr vermutet werden. | | | | | |
| Dieses Item ist insgesamt gelungen. | | | | | |
| Dieses Item ist... | <p style="text-align: center;"> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> sehr schwer schwer mittel schwer leicht sehr leicht </p> | | | | |

Allgemeine Anmerkungen:

b) Zu Item Nr. 2

Das Item:

Frage 2. Wenn ein Laserstrahl auf den nichtlinearen Kristall fällt...

- ...kommt es zur Aussendung von Licht.
- ...kommt es zu einer Aufspaltung in zwei Teilstrahlen.
- ...kommt es zur Aussendung eines Beugungskegels mit Öffnungswinkel 3° .

Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.

Ihre Bewertung:

| Aussage | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--|---|---|---|---|---|
| Der Inhalt dieses Items ist relevant für den Unterricht der Quantenoptik. | | | | | |
| Dieses Item prüft einen entscheidenden Inhaltsaspekt des Unterrichtskonzepts. | | | | | |
| Die Distraktoren sind authentisch; könnten also von jemandem, der die Antwort nicht sicher kennt, als wahr vermutet werden. | | | | | |
| Dieses Item ist insgesamt gelungen. | | | | | |
| Dieses Item ist... | | | | | |
| <input type="checkbox"/> sehr schwer <input type="checkbox"/> schwer <input type="checkbox"/> mittel schwer <input type="checkbox"/> leicht <input type="checkbox"/> sehr leicht | | | | | |

Allgemeine Anmerkungen:

c) Zu Item Nr. 3

Das Item:

Frage 3. Unser Auge ist als Detektor für einzelne Photonen nicht geeignet, weil...

- ...die Intensität des so auf das Auge fallenden Lichts zu gering ist.
- ...mit dem Auge nur bestimmte Wellenlängen wahrgenommen werden können, nicht aber die einzelner Photonen.
- ...die Photonen zu klein sind, um sie mit unseren Augen aufzulösen.

Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.

Ihre Bewertung:

| Aussage | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--|---|---|---|---|---|
| Der Inhalt dieses Items ist relevant für den Unterricht der Quantenoptik. | | | | | |
| Dieses Item prüft einen entscheidenden Inhaltsaspekt des Unterrichtskonzepts. | | | | | |
| Die Distraktoren sind authentisch; könnten also von jemandem, der die Antwort nicht sicher kennt, als wahr vermutet werden. | | | | | |
| Dieses Item ist insgesamt gelungen. | | | | | |
| Dieses Item ist... | | | | | |
| <input type="checkbox"/> sehr schwer <input type="checkbox"/> schwer <input type="checkbox"/> mittel schwer <input type="checkbox"/> leicht <input type="checkbox"/> sehr leicht | | | | | |

Allgemeine Anmerkungen:

d) Zu Item Nr. 4

Das Item:

Frage 4. Wenn ein Elektron vom Energiezustand E_2 in den Energiezustand $E_1 < E_2$ übergeht, wird dabei Licht emittiert. Je größer die Energiedifferenz $\Delta E = E_2 - E_1$ ist, desto...

- ...mehr Photonen werden emittiert.
- ...größer ist die Wellenlänge des emittierten Lichts.
- ...kleiner ist die Wellenlänge des emittierten Lichts.

Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.

Ihre Bewertung:

| Aussage | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--|---|---|---|---|---|
| Der Inhalt dieses Items ist relevant für den Unterricht der Quantenoptik. | | | | | |
| Dieses Item prüft einen entscheidenden Inhaltsaspekt des Unterrichtskonzepts. | | | | | |
| Die Distraktoren sind authentisch; könnten also von jemandem, der die Antwort nicht sicher kennt, als wahr vermutet werden. | | | | | |
| Dieses Item ist insgesamt gelungen. | | | | | |
| Dieses Item ist... | | | | | |
| <input type="checkbox"/> sehr schwer <input type="checkbox"/> schwer <input type="checkbox"/> mittel schwer <input type="checkbox"/> leicht <input type="checkbox"/> sehr leicht | | | | | |

Allgemeine Anmerkungen:

e) Zu Item Nr. 5

Das Item:

Frage 5. Im nichtlinearen Kristall werden aus dem einfallenden Laserstrahl Photonenpaare generiert. Diese Photonenpaare entstehen unter Beachtung der Energieerhaltung und jedes Photon hat daher...

- ...die halbe Wellenlänge des einfallenden Lichts des Lasers.
- ...die gleiche Wellenlänge, wie das einfallende Licht des Lasers.
- ...die doppelte Wellenlänge des einfallenden Lichts des Lasers.

Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.

Ihre Bewertung:

| Aussage | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|--|---|---|---|---|
| Der Inhalt dieses Items ist relevant für den Unterricht der Quantenoptik. | | | | | |
| Dieses Item prüft einen entscheidenden Inhaltsaspekt des Unterrichtskonzepts. | | | | | |
| Die Distraktoren sind authentisch; könnten also von jemandem, der die Antwort nicht sicher kennt, als wahr vermutet werden. | | | | | |
| Dieses Item ist insgesamt gelungen. | | | | | |
| Dieses Item ist... | <p><input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/></p> <p>sehr schwer schwer mittel schwer leicht sehr leicht</p> | | | | |

Allgemeine Anmerkungen:

f) Zu Item Nr. 6

Das Item:

Frage 6. Im Einzelphotonendetektor...

- ...wird die Zahl der registrierten Photonen innerhalb eines Zeitintervalls gezählt.
- ...lösen detektierte Energieportionen Elektronenlawinen aus.
- ...befinden sich Ladungen zunächst oben und werden durch eine einfallende Energiemenge nach unten bewegt.

Sehr sicher.

Sicher.

Unentschlossen.

Unsicher.

Geraten.

Ihre Bewertung:

| Aussage | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Der Inhalt dieses Items ist relevant für den Unterricht der Quantenoptik. | | | | | |
| Dieses Item prüft einen entscheidenden Inhaltsaspekt des Unterrichtskonzepts. | | | | | |
| Die Distraktoren sind authentisch; könnten also von jemandem, der die Antwort nicht sicher kennt, als wahr vermutet werden. | | | | | |
| Dieses Item ist insgesamt gelungen. | | | | | |
| Dieses Item ist... | | | | | |
| | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | sehr schwer | schwer | mittel schwer | leicht | sehr leicht |

Allgemeine Anmerkungen:

g) Zu Item Nr. 7

Das Item:

Frage 7. Unter Interferenz versteht man...

- ...im Allgemeinen die Überlagerung von mindestens zwei elektromagnetischen Wellen.
- ...im Allgemeinen die Überlagerung von genau zwei Wellen. .
- ...im Allgemeinen die Überlagerung von mindestens zwei Wellen.

Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.

Ihre Bewertung:

| Aussage | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Der Inhalt dieses Items ist relevant für den Unterricht der Quantenoptik. | | | | | |
| Dieses Item prüft einen entscheidenden Inhaltsaspekt des Unterrichtskonzepts. | | | | | |
| Die Distraktoren sind authentisch; könnten also von jemandem, der die Antwort nicht sicher kennt, als wahr vermutet werden. | | | | | |
| Dieses Item ist insgesamt gelungen. | | | | | |
| Dieses Item ist... | | | | | |
| | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | sehr schwer | schwer | mittel schwer | leicht | sehr leicht |

Allgemeine Anmerkungen:

h) Zu Item Nr. 8

Das Item:

Frage 8. Führt man das Doppelspaltexperiment mit einzelnen Elektronen durch, so...

- ...sieht man das typische Interferenzmuster mit Minima und Maxima.
- ...sieht man zwei klar definierte Detektionsorte auf einem Schirm hinter dem Doppelspalt.
- ...sieht man zwei klar definierte Detektionsorte und ein Maximum nullter Ordnung auf einem Schirm hinter dem Doppelspalt.

Sehr sicher.
 Sicher.
 Unentschlossen.
 Unsicher.
 Geraten.

Ihre Bewertung:

| Aussage | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---|
| Der Inhalt dieses Items ist relevant für den Unterricht der Quantenoptik. | | | | | |
| Dieses Item prüft einen entscheidenden Inhaltsaspekt des Unterrichtskonzepts. | | | | | |
| Die Distraktoren sind authentisch; könnten also von jemandem, der die Antwort nicht sicher kennt, als wahr vermutet werden. | | | | | |
| Dieses Item ist insgesamt gelungen. | | | | | |
| Dieses Item ist... | | | | | |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| sehr schwer | schwer | mittel schwer | leicht | sehr leicht | |

Allgemeine Anmerkungen:

i) Zu Item Nr. 9

Das Item:

Frage 9. Man verwendet Interferometer in Einzelphotonenexperimenten, um...

- ...zu zeigen, dass Licht nicht aus Photonen besteht.
- ...zu zeigen, dass Photonen kein Weg zugeordnet werden kann.
- ...zu zeigen, dass Photonen Quanteneigenschaften besitzen.

Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.

Ihre Bewertung:

| Aussage | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--|---|---|---|---|---|
| Der Inhalt dieses Items ist relevant für den Unterricht der Quantenoptik. | | | | | |
| Dieses Item prüft einen entscheidenden Inhaltsaspekt des Unterrichtskonzepts. | | | | | |
| Die Distraktoren sind authentisch; könnten also von jemandem, der die Antwort nicht sicher kennt, als wahr vermutet werden. | | | | | |
| Dieses Item ist insgesamt gelungen. | | | | | |
| Dieses Item ist... | | | | | |
| <input type="checkbox"/> sehr schwer <input type="checkbox"/> schwer <input type="checkbox"/> mittel schwer <input type="checkbox"/> leicht <input type="checkbox"/> sehr leicht | | | | | |

Allgemeine Anmerkungen:

j) Zu Item Nr. 10

Das Item:

Frage 10. Wenn man die Einzelphotoneninterferenz im Michelson-Interferometer sieht, so muss sich das Photon im Interferometer am Strahlteiler aufgeteilt haben.

- Falsch, denn man sieht mit einzelnen Photonen keine Interferenzerscheinungen.
- Wahr, denn Licht wird am Strahlteiler auch in zwei Teilstrahlen aufgeteilt.
- Falsch, denn die Vorstellung des Photons als lokalisierbares Teilchen ist ungültig.

Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.

Ihre Bewertung:

| Aussage | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--|---|---|---|---|---|
| Der Inhalt dieses Items ist relevant für den Unterricht der Quantenoptik. | | | | | |
| Dieses Item prüft einen entscheidenden Inhaltsaspekt des Unterrichtskonzepts. | | | | | |
| Die Distraktoren sind authentisch; könnten also von jemandem, der die Antwort nicht sicher kennt, als wahr vermutet werden. | | | | | |
| Dieses Item ist insgesamt gelungen. | | | | | |
| Dieses Item ist... | | | | | |
| <input type="checkbox"/> sehr schwer <input type="checkbox"/> schwer <input type="checkbox"/> mittel schwer <input type="checkbox"/> leicht <input type="checkbox"/> sehr leicht | | | | | |

Allgemeine Anmerkungen:

k) Zu Item Nr. 11

Das Item:

Frage 11. Laserlicht ist klassisches Licht, denn...

...für Laserlicht gilt $\alpha > 1$.

...für Laserlicht gilt $\alpha < 1$.

...für Laserlicht gilt $\alpha = 1$.

Sehr sicher.

Sicher.

Unentschlossen.

Unsicher.

Geraten.

Ihre Bewertung:

| Aussage | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Der Inhalt dieses Items ist relevant für den Unterricht der Quantenoptik. | | | | | |
| Dieses Item prüft einen entscheidenden Inhaltsaspekt des Unterrichtskonzepts. | | | | | |
| Die Distraktoren sind authentisch; könnten also von jemandem, der die Antwort nicht sicher kennt, als wahr vermutet werden. | | | | | |
| Dieses Item ist insgesamt gelungen. | | | | | |
| Dieses Item ist... | | | | | |
| | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | sehr schwer | schwer | mittel schwer | leicht | sehr leicht |

Allgemeine Anmerkungen:

I) Zu Item Nr. 12

Das Item:

Frage 12. Für jedes Einzelphotonenexperiment benötigt man...

- ...zwei Einzelphotonendetektoren.
- ...mindestens zwei Einzelphotonendetektor.
- ...mindestens drei Einzelphotonendetektoren.

Sehr sicher. Sicher. Unentschlossen. Unsicher. Geraten.

Ihre Bewertung:

| Aussage | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Der Inhalt dieses Items ist relevant für den Unterricht der Quantenoptik. | | | | | |
| Dieses Item prüft einen entscheidenden Inhaltsaspekt des Unterrichtskonzepts. | | | | | |
| Die Distraktoren sind authentisch; könnten also von jemandem, der die Antwort nicht sicher kennt, als wahr vermutet werden. | | | | | |
| Dieses Item ist insgesamt gelungen. | | | | | |
| Dieses Item ist... | | | | | |
| | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | sehr schwer | schwer | mittel schwer | leicht | sehr leicht |

Allgemeine Anmerkungen:

m) Zu Item Nr. 13

Das Item:

Frage 13. Photonen sind...

- ...kugelförmige Teilchen, die manchmal wellenartiges Verhalten zeigen.
- ...Bestandteile des Lichts, die von einer Welle umgeben sind, die für die Interferenz verantwortlich ist.
- ...Energieportionen.

Sehr sicher.
 Sicher.
 Unentschlossen.
 Unsicher.
 Geraten.

Ihre Bewertung:

| Aussage | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Der Inhalt dieses Items ist relevant für den Unterricht der Quantenoptik. | | | | | |
| Dieses Item prüft einen entscheidenden Inhaltsaspekt des Unterrichtskonzepts. | | | | | |
| Die Distraktoren sind authentisch; könnten also von jemandem, der die Antwort nicht sicher kennt, als wahr vermutet werden. | | | | | |
| Dieses Item ist insgesamt gelungen. | | | | | |
| Dieses Item ist... | | | | | |
| | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | sehr schwer | schwer | mittel schwer | leicht | sehr leicht |

Allgemeine Anmerkungen:

n) Fragen zum Testinstrument als Ganzes

| Aussage | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| Die Items stellen relevante Inhalte des Unterrichtskonzepts dar. | | | | | |
| Die Inhalte stehen in einem angemessenen Verhältnis zueinander, d.h. die Gewichtung der Inhaltsbereiche ist sinnvoll. | | | | | |
| Das Testinstrument besitzt eine hohe Passung zum entwickelten Unterrichtskonzept und den damit vermittelten Inhalten. | | | | | |
| Das Testinstrument deckt wichtige Inhaltsaspekte der Einzelphotonenexperimente ab. | | | | | |

Allgemeine Anmerkungen:

ANHANG F

Zu Kapitel 7

Die folgenden Unterlagen sind Kapitel 7 dieser Arbeit beigefügt:

- Anschreiben an die Eltern der an der Hauptstudie teilnehmenden Schülerinnen und Schüler



FRIEDRICH-ALEXANDER
UNIVERSITÄT
ERLANGEN-NÜRNBERG

NATURWISSENSCHAFTLICHE
FAKULTÄT

Universität Erlangen-Nürnberg • Postfach 3520 • 91023 Erlangen

An die
Eltern der Schülerinnen und Schüler
des XY Gymnasiums

Department Physik

Professur für Didaktik der Physik

Philipp Bitzenbauer

Staudtstr. 7., 91058 Erlangen
Telefon +49 9131 85-28437
philipp.bitzenbauer@fau.de

Erlangen, den

Wissenschaftliche Studie: Quantenphysik mit Einzelphotonenexperimenten

Sehr geehrte Eltern,

die Quantenphysik ist eine der erfolgreichsten Theorien der Naturwissenschaft Physik und hochaktuelles Thema in der fachwissenschaftlichen Forschung. Technische Weiterentwicklungen erlauben heute die Durchführung moderner Experimente, wie man sie auch in Forschungslaboren findet, auch in der Schule. Solche Realexperimente mit einzelnen Photonen wurden an der Professur für Didaktik der Physik an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg entwickelt und für die Schule in interaktiven Bildschirmexperimenten didaktisch aufbereitet. Mit diesen erleben die Schülerinnen und Schüler die Quantennatur des Lichts und lernen moderne Experimente im Klassenzimmer kennen.

Diese wurden in ein Unterrichtskonzept eingebettet und Arbeitsmaterialien wurden entworfen. Die Universität Erlangen führt nun eine wissenschaftliche Studie im Fach Physik durch, an der auch die Schulklasse Ihres Kindes teilnehmen wird. Hauptziel der Studie ist es zu klären, inwiefern die Experimente im Rahmen des Unterrichts zu einem lernwirksamen Unterricht beitragen und ob man in der Lage ist, das Interesse der Schülerinnen und Schüler für die Physik damit zu verbessern. Im Rahmen der Studie werden die Schülerinnen und Schüler das Unterrichtskonzept erleben und zu Forschungszwecken einen Fragebogen bearbeiten. Dieser erhebt neben dem Interesse am Physik und am Experimentieren auch fachliche Aspekte zur Quantenphysik.

Selbstverständlich wird die Studie unter strengsten Datenschutzbedingungen durchgeführt, die wir Ihnen im Folgenden ausführlich erläutern: Alle erhobenen Daten werden ausschließlich für wissenschaftliche Zwecke und in anonymisierter Form verwendet. Ergebnisse werden nur in

zusammengefasster Form, nicht aber auf Ebene einzelner Schulklassen oder gar einzelner Schülerinnen und Schüler in Fachzeitschriften oder in wissenschaftlichen Arbeiten veröffentlicht.

Die Namen der Teilnehmerinnen und Teilnehmer werden nicht erfasst. Insbesondere erhalten die Lehrkräfte keine Einsicht in die von ihrem Kind gemachten Angaben in den Fragebögen. Es werden **keinerlei** persönliche Daten erhoben.

Wir wären Ihnen sehr dankbar, wenn Sie unsere Forschung unterstützen würden und Ihr Kind an der Studie teilnehmen dürfte. Durch die untenstehende Einverständniserklärung teilen Sie uns bitte mit, ob Ihr Kind teilnehmen darf. Diese Teilnahme ist freiwillig und aus einer Nichtteilnahme entstehen keinerlei Nachteile. Bitte geben Sie Ihrem Kind die ausgefüllte Einverständniserklärung zurück mit in den Unterricht. Geben Sie die Einverständniserklärung bitte auch zurück, wenn Sie nicht einverstanden sind und kreuzen Sie dazu das zugehörige Feld an!

Mit freundlichen Grüßen,

Philipp Bitzenbauer

Prof. Dr. Jan-Peter Meyn

✂

**Einverständniserklärung zur Teilnahme an der wissenschaftlichen Studie
„Quantenphysik mit Einzelphotonenexperimenten“**

Ich/Wir bin/sind damit

einverstanden,

nicht einverstanden,

dass mein/unser Kind _____, geb. _____

im Rahmen der wissenschaftlichen Studie der Universität Erlangen an der Fragebogenerhebung teilnimmt und die dadurch gewonnenen Daten anonymisiert für wissenschaftliche Zwecke verwendet werden.

ANHANG G

Zu Kapitel 11

Die folgenden Unterlagen sind Kapitel 11 dieser Arbeit beigelegt:

- Interviewleitfaden in der finalen Version
- Kodierleitfaden mit Ankerbeispielen
- Die Transkriptionen zur Interviewstudie finden sich auf der Daten-CD

Leitfadengestütztes Interview Quantenoptik – Final

Guten Tag, vielen Dank, dass du dir Zeit für dieses Interview nimmst. Wir sitzen hier, weil uns dein Verständnis und deine Interpretation zur Quantenphysik interessiert. Mit unserer Unterhaltung möchten wir herausfinden, wie du darüber denkst. Ich arbeite an der Universität. Das Ziel meiner Untersuchung ist die Verbesserung des Unterrichts. Deine Angaben werde ich vertraulich behandeln.

Teil 1: Gesprächsinitiierender Einstieg

| | |
|---------------------------|--|
| Leitfrage: | Beschreibe doch einmal, was für dich die Quantenwelt ausmacht. |
| Nachfragen: | <ul style="list-style-type: none">• Was charakterisiert denn für dich die Quantenwelt?• Wo liegen für dich Unterschiede zur klassischen Welt? |
| Aufrechterhaltungsfragen: | <ul style="list-style-type: none">• Gibt es dazu noch weitere Aspekte, die dir einfallen?• Kannst du noch weitere Beispiele nennen?• ... |

Teil 2: Fragen zu den Wesenszügen der Quantenphysik (Einzelaspekte)

Wahrscheinlichkeitsdeutung

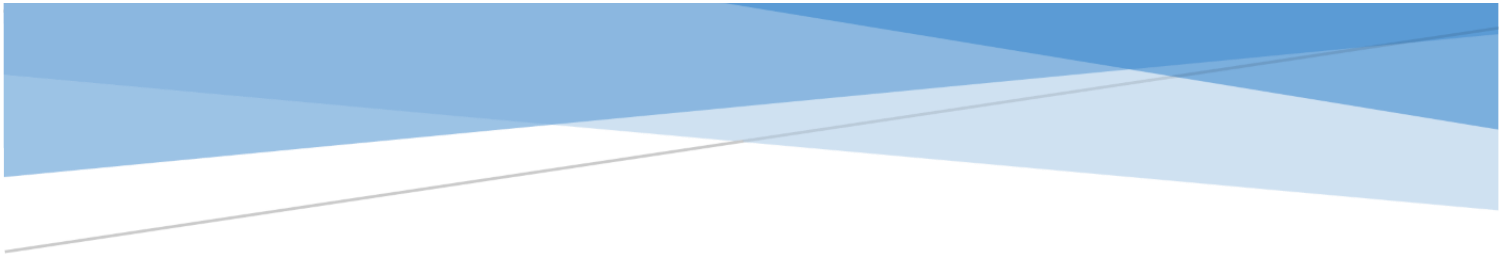
- i. Beschreibe doch einmal ein Experiment, in dem man Quantenzufall finden kann.
NF: An welcher Stelle auf dem Schirm ein einzelnes Elektron im Doppelspaltexperiment auftritt, kann mich nicht vorhersagen. Wenn ich mit einem Würfel würfeln, kann ich das Ergebnis ebenfalls nicht vorhersagen. Gibt es zwischen den beiden Situationen einen Unterschied?
(aus Müller, 2003)
- ii. Beschreibe und erkläre doch einmal folgende Aussage: „In der Quantenmechanik sind im Allgemeinen nur statistische Vorhersagen möglich.“

Eigenschaftsbegriff / Interferenzfähigkeit von Quantenobjekten

- i. Kannst du erst einmal den Begriff Interferenz erklären?
- ii. Kannst du dich an ein Experiment erinnern, indem wir Interferenz einzelner Quantenobjekte gesehen haben? Kannst du dieses Experiment beschreiben?
- iii. Jemand behauptet, dass ein Photon im Doppelspalt-Experiment immer entweder durch den rechten oder durch den linken Spalt geht. Wie würdest du ihn widerlegen?
(Man kann den Ort doch messen, z.B. mit einer Lichtquelle. Widerspricht das nicht deiner vorherigen Aussage?) **(aus Müller, 2003)**
- iv. Beschreibe und erkläre doch einmal folgende Aussage am Beispiel eines Experiments: „Einzelne Quantenobjekte können zu einem Interferenzmuster beitragen, wenn es für das Versuchsergebnis mehr als eine klassisch denkbare Möglichkeit gibt.“

Teil 3: Fragen mit konkretem Bezug zum Unterrichtskonzept

1. Was ist denn deine Vorstellung zu einem Photon?
2. Damit man mit Photonen experimentieren kann, muss an diese zunächst **erzeugen**. Kannst du beschreiben, welche Geräte oder Objekte man dazu benötigt und warum?
3. Nach dem Erzeugen, will man sie auch messen, um ihre Eigenschaften zu untersuchen. Dazu haben wir Detektoren verwendet. Kannst du mal grob beschreiben, wie diese Detektoren funktionieren?
4. Begründe bitte, warum es nicht reicht mit einem einzigen Einzelphotonendetektor zu arbeiten in den Experimenten. (Nachfrage: Was verstehst du denn unter dem Begriff „Dunkelzählrate“?)
5. Beschreibe mal, was du unter dem Begriff „Koinzidenz“ verstehst.
6. Was verstehst du im Zusammenhang von Photonen unter dem Begriff „Ort“?
NF: Wenn man jetzt die Photonenpaare betrachtet, die von den Detektoren detektiert werden. Wie vereinbarst du das dann mit dem Fehlen einer Ortseigenschaft?
7. Wir betrachten nun das Koinzidenzexperiment. Welche Aufgabe hat nun dabei der sog. Triggerdetektor?
8. Welche Messgröße misst man denn in diesen Einzelphotonenexperimenten eigentlich und welche Einheit hat diese?
9. Beschreibe mal ein Experiment, mit dem man die Unteilbarkeit von Photonen finden kann.
10. Was bedeutet der Begriff Triplekoinzidenz und warum ist diese Größe im Experiment zur Unteilbarkeit entscheidend?
11. Erinner dich mal an den Faktor α . Kannst du dich erinnern, warum dieser Faktor interessant war?
12. Welchen Quanteneffekt hat man, wenn man $\alpha = 0$ misst?
13. Du als Quantenphysikexperte, bewerte doch einmal, was Einstein hier über Photonen schrieb und sage mir, was für dich Photonen sind: *„Nach der hier ins Auge zu fassenden Annahme ist bei Ausbreitung eines von einem Punkte ausgehenden Lichtstrahles die Energie nicht kontinuierlich auf größer und größer werdende Räume verteilt, sondern es besteht dieselbe aus einer endlichen Zahl von in Raumpunkten lokalisierten Energiequanten, welche sich bewegen, ohne sich zu teilen...“*



KODIERLEITFADEN

Interviewstudie zur Quantenoptik

Bitzenbauer Philipp

Forschungsfragen und Aufbau des Interviewleitfadens

Die leitfadengestützten Interviews sind der qualitative Teil im Rahmen der summativen Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik. Ganz zentral geht es dabei darum, inwiefern die Schülerinnen und Schüler durch das Erlanger Unterrichtskonzept zur Quantenoptik zu einem adäquaten Verständnis der ersten beiden Wesenszüge der Quantenphysik gelangen. Die Interviewstudie dient der Klärung der nachfolgend dargestellten Forschungsfragen:

Forschungsfragen

1. Was macht für die Schülerinnen und Schüler, die das Erlanger Konzept erlebt haben, die Quantenwelt aus?
2. Gelangen die Schülerinnen und Schüler zu einem Verständnis des Wesenszugs „Statistisches Verhalten“ der Quantenphysik und welchen Begriff von Statistik und Zufall in der Quantenphysik besitzen sie nach Durchlaufen des Erlanger Konzepts?
3. Gelangen die Schülerinnen und Schüler zu einem Verständnis des Wesenszugs „Fähigkeit zur Interferenz“ der Quantenphysik und welche Erklärungsmuster für das Auftreten von Interferenz einzelner Quantenobjekte entwickeln sie nach Durchlaufen des Erlanger Konzepts?
4. Welche Vorstellung zum Photon entwickeln Schülerinnen und Schüler im Rahmen des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik?
5. Erreichen die Schülerinnen und Schüler ein konzeptuelles Verständnis
 - a. für die Eigenschaft „Ort“ in der Quantenphysik?
 - b. für die Präparation von Quantenzuständen?
 - c. für die Antikorrelation am halbdurchlässigen Spiegel?

Der Interviewleitfaden ist in drei Teile untergliedert, um die o.g. Forschungsfragen zu beantworten:

| Teil | Beschreibung | Beispielfrage(n) | Adressierte Forschungsfrage |
|------|--------------------------------|---|-----------------------------|
| 1 | Gesprächsinitierender Einstieg | Beschreibe doch einmal, was für dich die Quantenwelt ausmacht. | FF 1 |
| 2 | Wesenszüge der Quantenphysik | - Beschreibe und erkläre doch einmal die folgende Aussage: „ <i>Einzelne Quantenobjekte können zu einem Interferenzmuster beitragen, wenn es für das Versuchsergebnis mehr als eine klassisch denkbare Möglichkeit gibt.</i> “ - Jemand behauptet, dass ein Photon im Doppelspalt immer entweder durch den rechten oder durch den linken Spalt geht. Wie kannst du ihn widerlegen? | FF 2 FF 3 |
| 3 | Quantenoptik | - Was ist denn deine Vorstellung zu einem Photon? - Begründe bitte, warum es in Quantenexperimenten nicht reicht mit | FF 4 FF 5 |

einem einzigen
Einzelphotonendetektor zu arbeiten.

- Beschreibe einmal, was du unter
„Koinzidenz“ verstehst.

FF 5

Die Auswertung der einzelnen Interviewteile erfolgt unterschiedlich:

- Teil 1, 2 und 3 – FF4: Qualitative Beschreibung der Schülerantworten und Kategorisierung auf Grundlage deduktiv und induktiv entwickelter Kategoriensysteme
- Rest Teil 3: Bewertung der einzelnen Schülerantworten auf einer dreistufigen Skala (2 = sehr gute elaborierte Antwort; 0 = nicht ausreichende oder fehlerhafte Antwort)

Die Kodierleitfäden werden nachfolgend dargestellt: Die einzelnen Kategorien wurden zum Teil deduktiv, zum Teil induktiv gewonnen. Deduktiv gewonnene Kategorien entspringen der Schülervorstellungsforschung zur Quantenphysik. Entsprechende Kategorien werden mit Zitat genannt. Induktiv gewonnene Kategorien entstanden durch Sichtung und Reduktion der Transkriptionen der Interviews und vervollständigen die Kategoriensysteme. Dies trägt der Anforderung *Exhaustivität* Rechnung: die jeweiligen Merkmale werden dadurch erschöpfend beschrieben (Bortz, 1995).

a) Kodierleitfaden für Teil 1 (FF 1):

| Kategorie | Definition | Ankerbeispiel |
|---|--|--|
| Kontinuierlicher Übergang zu immer kleiner werdenden Objekten [Skalvorst.] (Wiesner, 1989/1996) | Textstellen, die auf Mikroobjekte oder das „Kleinste“ hinweisen | „Wenn ich an die Quantenwelt denke, dann stelle ich mir [...] einen ziemlich leeren Raum vor, in dem halt nur ein paar kleine [...] Partikel drin sind, Quantenobjekte halt.“ |
| Quantenwelt als Welt des Dualismus/der Modellbeschreibung [Dualismus] (Wiesner, 1989/1996) | Textstellen, die deutlich machen, dass die Quantenwelt eine Modellbeschreibung notwendig macht. | „Quantenwelt lässt sich schwer in Worte fassen, einfach dadurch, dass sie von uns nur durch Modelle vorstellbar gemacht werden kann, wobei keines dieser Modelle wirklich zutrifft [...].“ |
| Quantenwelt als Welt von Effekten oder Tatsachen, die in der klassischen Welt nicht auftreten [Quaneff] (Erweitert nach Wiesner, 1989/1996) | Textstellen, die sich auf Effekte oder Tatsachen beziehen, die in der Quantenwelt, nicht aber in der klassischen Welt vorliegen (z.B. Quantenzufall, fehlende Eigenschaft, Quantisierung, ...) | „[...] also wirklich den Quantenzufall eben, dass es einfach komplett zufällig ist und man es nicht vorher sagen kann [...], was als nächstes passieren wird, weil das [...] kompletter Zufall ist und nicht so wie in der realen Welt.“ |
| Quantenwelt mit Chancen für Technik und Forschung [TechnFors] | Textstellen, die sich auf die Quantenphysik und ihr Potential für Technik und Forschung, z.B. Quantencomputer, beziehen. | „Mit [...] Quantenphysik und Technik können wir auch diese Quantencomputer mal entwickeln, damit wir mit diesen [...] etwas schneller rechnen und [...] eine bessere Sicht auf unsere ganzen Daten zu schaffen.“ |
| Quantenwelt als Welt ohne konkrete Vorstellbarkeit [konkr.Vorst.] | Textstellen, die sich darauf beziehen, dass man sich die Quantenwelt und/oder ihre Elemente nicht bildlich vorstellen kann. | „In der klassischen Welt [...], da hat alles einen Ort und man kann sich alles vorstellen, wie es aussieht und in der Quantenwelt ist das halt nicht der Fall, also man könnte nicht sagen, wie ein Photon wirklich aussieht [...].“ |

b) Kodierleitfaden für Teil 2 – Statistisches Verhalten (FF 2)

Frage i): Was verstehen Sie unter Quantenzufall?

Frage iii): Ich kann nicht vorhersagen, wo einzelnes Elektron auf Schirm nach Doppelspalt auftrifft, und ich kann das Ergebnis eines Würfelwurfs nicht vorhersagen. Gibt es einen Unterschied zwischen diesen Aussagen?

Frage iv): Beschreibe und erkläre doch bitte einmal die folgende Aussage: [...]

Auswertung dieser drei Fragen gemäß des folgenden Kategoriensystems.

| Kategorie | Definition | Ankerbeispiel |
|---|---|---|
| Wahrscheinlichkeit als Auftreff- oder Aufenthaltswahrscheinlichkeiten [Aufenthaltswsl.] | Behandlung des Begriffs der Wahrscheinlichkeit zur Lokalisierung von Quantenobjekten in Volumenelementen o.ä. | „[...] man kann mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit vorhersagen, wo das Elektron auftreffen wird, also es war ja so, [...], dass in einer Mitte bei dem Schirm die Wahrscheinlichkeit höher ist, als weiter außen.“ |
| Verborgene Parameter [VerborgPar] (erweitert nach Bethge, 1988/1992) | Objekt tieferliegende Ebene der Erkenntnis ist uns nur nicht zugänglich, aber prinzipiell existent. | „[...] vielleicht haben wir irgendwann in der Zukunft die Möglichkeit, das doch irgendwie messen und vorhersagen zu können.“ |
| Deutung als rel. Häufigkeit [relHäufig] | Textstellen, die Wahrscheinlichkeit als rel. Häufigkeit von Messergebnissen festlegen. | „[...] also es gibt immer eine Wahrscheinlichkeit und aus diesen Wahrscheinlichkeiten dann den Mittelwert, gibt ungefähr an, wie wahrscheinlich oder wie häufig ein Ereignis eintritt und dementsprechend kann man auch sagen, welches Ereignis jetzt am wahrscheinlichsten ist, was bei einem Quantenexperiment passiert.“ |
| Wahrscheinlichkeit für stat. Aussagen bezogen auf Ensembles von Quantenobjekten [VorherEns] | Textstellen, die sich auf stat. Aussagen im Bezug auf Ensembles von Quantenobjekten beziehen. | „[...] die Menge an Durchführungen von Experimenten, die man eben macht, zu einem Mittelmaß aufzeigen kann, wie sich eben diese Quantenobjekte dann verhalten.“ |
| Quantenzufall als absoluter Zufall [absZufall] | Textstellen, die Quantenzufall klar vom Zufall in der kl. Physik abgrenzen und diesen als absolut bezeichnen. | „Wenn ich jetzt einen Würfel habe [...], dann kann ich am Ende nach einer ewig langen Simulation [...] sagen, was theoretisch rauskommen wird, aber da ich bei einem Quantenteilchen eben nicht weiß, was es macht, kann ich nichts berechnen.“ |
| Keine Vorstellung [kA] | Keine inhaltlich sinnvolle Charakterisierung, oder Angabe, dass diese nicht genannt werden kann | „Man hat ja diese zwei Detektoren gehabt und man wusste ja jetzt auch nicht, ob der eine oder der andere klickt [...].“ |

Frage ii): Beschreibe doch einmal ein Experimente, in dem man Quantenzufall finden kann.
Bewertung auf Skala von 0-2 Punkten mit halben Punkten.

- 0 Punkte: kein Experiment / Unklare, unzusammenhängende Darstellung / richtiges Experiment, aber falsche Darstellung
- 1 Punkt: Transmission und Reflektion (1/2 P.) am Strahlteilerwürfel (1/2 P.)
- 2 Punkt: Notwendig sind präparierte Einzelphotonenzustände, d.h. 3 Detektoren und Koinzidenzprinzip (1 P.)

c) Kodierleitfaden für Teil 2 – Fähigkeit zur Interferenz (FF 3)

Frage i): Kannst du erst einmal den Begriff Interferenz erklären?

Hier wird abgefragt, ob die Befragten etwas mit dem Begriff anfangen können, um den es im Folgenden geht.

Frage ii): Kannst du dich an ein Experiment erinnern, in dem wir die Interferenz einzelner Quantenobjekte gesehen haben? Kannst du dieses Experiment beschreiben?

Bewertung auf Skala von 0-2 Punkten mit halben Punkten.

- 0 Punkte: kein Experiment / Unklare, unzusammenhängende Darstellung / richtiges Experiment, aber falsche Darstellung
- 1 Punkt: Strahlteilerwürfel (1/2 P.) und Spiegel (1/2 P.)
- 2 Punkt: Dritter Detektor (1/2 P.) und Präparation Einzelphotonenzustand (1/2 P.)

Frage iv): Beschreibe und erkläre doch einmal die folgende Aussage: [...]

Qualitative Auswertung gemäß untenstehenden Kategoriensystems.

| Kategorie | Definition | Ankerbeispiel |
|--|---|--|
| Interferenz einzelner Quantenobjekte erklärt mittels stat. Deutung der Quantenphysik [Int.stat.D.] | Textstellen, die auf eine Erklärung der Interferenz einzelner Quantenobjekte mittels stat. Deutung oder des Zufalls hindeuten. | I: Und wann sehen wir dann ein Interferenzmuster? B: Wenn man mehr als eins durchschickt und sehr, sehr viele [...]. |
| Interferenz einzelner Quantenobjekte erklärt mittels fehlender Lokalisierbarkeit von Quantenobjekten [Int.Ort] | Textstellen, die auf eine Erklärung der Interferenz einzelner Quantenobjekte mittels deren fehlender permanenter Lokalisierbarkeit hindeuten. | „Aber es ist dann [...] ein Interferenzmuster entstanden, und das bedeutet eben, also, dass wie gesagt, diese Photonen keinen Ort haben, keinen permanenten Ort.“ |
| Interferenz im Teilchenbild erklärt [Intf.Teilchen] | Textstellen, die auf den Versuch einer Erklärung der Interferenz einzelner Quantenobjekte in einem „Teilchenbild“ hindeuten. | „Und das war eben das besondere, das bei einem Photon eben trotzdem ein Interferenzmuster vorherrscht, obwohl zum Beispiel die Unteilbarkeit eine Teilcheneigenschaft ist.“ |
| Selbstinterferenz [Selbstintf.] | Textstellen, die auf den Versuch einer Erklärung der Interferenz einzelner Quantenobjekte über Selbstinterferenz hindeuten. | „Ich schieße einzelne Photonen [...] auf einen Doppelspalt und es bildet sich trotzdem ein Interferenzmuster, obwohl es nur einzelne Photonen sind, d.h. die interferieren sozusagen mit sich selbst.“ |
| Quantenobjekte ≠ Teilchen [QO≠Teilchen] | Textstellen, in denen betont wird, dass die Interferenz einzelner | „Also beim Doppelspaltexperiment, da würde man ja vermuten, dass es eigentlich einfach nur zwei Striche sozusagen am |

| | | |
|---|--|--|
| | Quantenobjekte einem naiven Teilchenbild entgegensteht. | Spalte bei der Scheibe bilden, aber weil das ja nicht der Fall ist, sondern da ja ein Interferenzmuster erscheint, weiß man halt, dass es sich wie Quantenobjekte verhält und nicht wie ein Teilchen.“ |
| Quantenobjekte = Wellen [QO = Welle] | Textstellen, die darauf hindeuten, dass die Interferenz einzelner Quantenobjekt dafür spricht, dass diese als Wellen aufzufassen sind. | „Also ja, wenn es Wellen sind die sich überlagern, dann gibt es ja Interferenz.“ |

d) Kodierleitfaden für Teil 3 – Photonenvorstellung (FF 4)

In die Beantwortung der FF 4 gehen die Fragen 1 und 13 aus Teil 3 des Interviews ein, um zwei unterschiedliche Perspektiven auf die gleiche Frage zu gelangen und auch gewisse Vorstellungen bei den Befragten zu wecken.

| Kategorie | Definition | Ankerbeispiel |
|--|--|---|
| Naive Teilchen- vorstellung [NaivTeil] (Bormann, 1987) | Textstellen, die auf eine Vorstellung von kugelförmiger Gestalt von Photonen hinweisen | -- |
| Photonen als Lichtteilchen mit Wellen- und Teilchen- eigenschaften [TeildLi] (Wiesner, 1996) | Eine um eine dualistische Beschreibung erweiterte Teilchenvorstellung, die Modell- und Wirklichkeitsebene vermischt. | „Eigentlich eher ein Teilchen, aber eben das auch Welleneigenschaften hat, also man kann es nicht wirklich als Welle bezeichnen finde ich, also für mich es ein Teilchen mit Welleneigenschaften.“ |
| Energiequant [Energiequ] (Wiesner, 1996) | Photon wird als Energieportion gesehen. | „[...] ein Photon ist jetzt meiner Meinung nach eigentlich eine Energieportion, der zu einer bestimmten Zeit einfach kein fester Ort zugeordnet werden kann, also man kann zu manchen Zeitpunkten sagen, dass hier ein Photon war, aber nicht immer.“ |
| Indifferente Vorstellung [IndiffVorst] | Dass Teilchenvorstellung physikalisch zu Fehlschlüssen führt ist bewusst, aber kugelförmige Vorstellung wird beibehalten. | „Also man darf sich das nicht so vorstellen, dass die Objekte da lokalisierbar sind, dass sie einen festen Ort haben, sondern die haben einfach keinen festen Ort. Man darf sie sich einfach nicht als Teilchen vorstellen, als eine Kugel, die Vorstellung darf man einfach nicht haben. Die ist falsch. Und trotzdem habe ich sie, ja. Keine Ahnung, das ist so. Wie soll man es sich auch sonst vorstellen, ich weiß nicht.“ |
| Teilchen- vorstellung explizit abgelehnt [Abl.Teil] | Textstellen, die darauf hinweisen, dass die (naive) Teilchenvorstellung explizit abgelegt wurde, und nachweist, dass die Probanden ein Bewusstsein dafür haben, dass ein Photon mit keinem Objekt der Lebenswelt vergleichbar ist. | „[...] Also in der Schule wurde uns immer gesagt, dass Photonen Lichtteilchen sind, aber [...] weiß ich jetzt eben, fass sie keine Teilchen sind, weil sie nicht lokalisierbar sind und Photonen sind unteilbar, sie haben eine Energie und können sich bewegen.“ |
| Energiequant, das sich in Wellenform bewegt [EnergieWe] | Photon wird als Energieportion gesehen, die sich entlang einer Welle bewegt. | „Naja also wir haben sozusagen ein Photon, stell ich mir so vor als ob es eben Energie wäre, das sozusagen, ja, durch den Raum fliegt und diese Energie bewegt sich nicht gerade durch, durch den Raum, sondern eben in Wellenform.“ |

e) Kodierleitfaden für Teil 3 – Eigenschaft Ort in der QP (Fragen IIbiii, III6 zu FF 5a)

In die Beantwortung der FF 5 gehen die Fragen b, iii) aus Teil 2, sowie die Frage 6 aus Teil 3 des Interviews ein, um zwei unterschiedliche Perspektiven auf die gleiche Frage zu gelangen und auch gewisse Vorstellungen bei den Befragten zu wecken.

| Kategorie | Definition | Ankerbeispiel |
|--|--|--|
| Fehlende permanente Lokalisierung [permLokal] | Textstellen, die auf eine fehlende (permanente) Lokalisierbarkeit von Quantenobjekten hinweisen. | „Ja, also ich verstehe darunter, dass Photonen, das sind ja auch Quantenobjekte, [...], denen kann man nicht zu jedem Zeitpunkt einen genauen lokalen Ort zuweisen.“ |
| Bahnbegriff direkt zur Beschreibung von quantenphysikalischen Phänomenen [BahnPh] (nach Bethge, 1988/1992) | Textstellen, die konkreten Bezug auf die Bahn bzw. den Ort von Quantenobjekten in Erklärungen nehmen. | „Und in der Quantenwelt ist es ja eben, dass es so, dass die einzelnen Quanten durch beide Spalte gleichzeitig gehen scheinbar, obwohl es jetzt eigentlich nur ein Quantenobjekt ist.“ |
| Praktische Schwierigkeiten bei der Ortsbestimmung [BestSchw] (Wiesner, 1996) | Textstellen, die Hinweise in Richtung Messschwierigkeiten liefern. | „Also ich denke, dass man den Ort halt nur messen könnte, [...], also wenn ein Detektor ein Signal aufnimmt. Aber dann weiß man ja auch nicht so genau, woher das Signal kommt, [...], also man weiß ja nicht aus welcher Richtung das Signal kommt.“ |
| Ortsangabe möglich, wenn auf Impulsangabe verzichtet wird [Heisenberg] (Wiesner, 1996) | Hinweise im Kontext der Heisenberg'schen Unbestimmtheitsrelation. | „Also wenn man diesen Ort bestimmt, kann man in dem Moment, jetzt z.B. die Geschwindigkeit nicht bestimmen, wenn man die Geschwindigkeit weiß, kann man den Ort nicht genau bestimmen.“ |
| Präparation vom Eigenschaften [Präparation] (Wiesner, 1996) | Textstellen, die darlegen, dass Eigenschaften in der Quantenphysik zu präparieren, am Beispiel des Orts z.B. durch eine Koinzidenzmessung. | B: Durch dieses Experiment [das Koinzidenzexperiment] hat man dann von den Photonen für kurze Zeit so einen [Ort] präpariert, weil eigentlich haben die ja keinen Ort. I: Mhm, wodurch wurde jetzt der Ort genau präpariert? B: Ja dadurch, dass man eben durch diesen Kristall das Photonenpaar erzeugt hat und dann wusste man ja durch die beiden Detektoren, wo es sich gerade befindet. |
| „Kollaps der Wellenfunktion“ [OrtsmesQZ] | Textstellen, die betonen, dass Messung Quantenzustand ändert, | „Dummerweise geht das Photon dabei [bei der Messung] auch kaputt, weil es alle Energie an das elektrische System abgibt und danach nicht mehr existiert.“ |

f) Kodierleitfäden für Teil 3

Die FF 5b und 5c werden nicht qualitativ, sondern primär quantitativ ausgewertet, da es um Fachwissen im Kontext „Quantenoptik“ geht. Damit kann die Frage geklärt werden, inwiefern ein Verständnis für quantenoptische Konzepte aufgebaut wurde, welches über ein reines Begriffsverständnis hinausgeht. Geprüft wird dabei insbesondere, ob ein Verständnis derart aufgebaut wurde, dass die Schülerinnen und Schüler innerhalb des neuen Begriffsnetzes zu konsistenten Argumentationen in der Lage sind.

Die quantenoptischen Konzepte „Einzelphotonendetektoren“ und „Koinzidenzmessung“ werden im Rahmen der Interviews im Fragenkomplex „Präparation von Quantenzuständen“ zusammengefasst. Die Bewertung der Aussagen erfolgt auf einer dreistufigen Skala, die für die Auswertung als Intervallskala aufgefasst wird:

- Antwort niedriger Qualität (kodiert mit 0 Punkten): Die Antworten lassen keinerlei Schluss auf ein Verständnis zu und Fachbegriffe können gar nicht oder nur sehr unsicher wiedergegeben werden.
- Antwort mittlerer Qualität (kodiert mit 1 Punkten): Die Antworten deuten auf ein grundsätzliches Verständnis für die wesentlichen Aspekte des Themas hin, aber es gibt Unsicherheiten in der Verwendung von Fachbegriffen.
- Antwort hoher Qualität (kodiert mit 2 Punkte): Die Antworten zeigen, dass die wesentlichen Aspekte und Zusammenhänge gut verstanden wurden und die Fachbegriffe werden überwiegend richtig verwandt.

Die nachfolgend notierten Erwartungshorizonte legen exakt fest, wie die einzelnen Antworten zu codieren sind.

Kodierleitfaden für Teil 3 – Präparation von Quantenzuständen (FF 5b)

Zum Themenbereich „Präparation von Quantenzuständen“ gehören die folgenden Fragen des dritten Teils der Interviews:

| | |
|----------------------------------|---|
| Einzelphotonen-detektoren | 2. Damit man mit Photonen experimentieren kann, muss an diese zunächst erzeugen . Kannst du beschreiben, welche Geräte oder Objekte man dazu benötigt und warum? |
| | 3. Nach dem Erzeugen, will man sie [die Photonen] auch messen, um ihre Eigenschaften zu untersuchen. Dazu haben wir Detektoren verwendet. Kannst du mal grob beschreiben, wie diese Detektoren funktionieren? |
| | 4. Begründe bitte, warum es nicht reicht mit einem einzigen Einzelphotonendetektor zu arbeiten in den Experimenten. (Nachfrage: Was verstehst du denn unter dem Begriff „Dunkelzählrate?“) |
| Koinzidenzmessung | 5. Beschreibe mal, was du unter dem Begriff „Koinzidenz“ verstehst. |
| | 7. Wir betrachten nun das Koinzidenzexperiment. Welche Aufgabe hat nun dabei der sog. Triggerdetektor? |
| | 8. Welche Messgröße misst man denn in diesen Einzelphotonenexperimenten eigentlich und welche Einheit hat diese? |

Kodierleitfaden:

| Fragen zu Einzelphotonen-detektoren | 2 | 3 | 4 |
|-------------------------------------|---|---|--|
| Schlagwörter | Nichtlinearer Kristall – (Dioden-)Laser – Energieerhaltung – Impulserhaltung - Photonenpaar | Lawinenanalogie – elektrisches Potential – elektr. Signal – Klicks | Dunkelzählrate – Ursache für Klick – Zufällige Klicks - ... |
| 0 Punkte | Kein Schlagwort genannt / falscher Zusammenhang | Kein Schlagwort genannt / falscher Zusammenhang | Kein Schlagwort genannt / falscher Zusammenhang |
| 1 Punkt | (Dioden)Laser auf (nichtlinearen) Kristall richten | <u>UND</u> : Photonen setzen Elektronen im Detektorinneren frei | <u>UND</u> : Dunkelzählereignisse zufällig |
| 2 Punkte | <u>UND</u> : Emission von Photonenpaaren <u>ODER</u> : Vergleich zu atomarem Energieübergang / Begründung über Energie- und/oder Impulserhaltung | <u>UND</u> : freigesetzte Elektronen setzen weitere Elektronen frei => messbares elektrisches Signal (Lawinenprozess) | <u>UND</u> : Rückschluss auf Photon nicht möglich <u>UND</u> : technisch bedingt <u>ODER</u> : Kühlung / ... |

| Fragen zu Koinzidenz- messung | 5 | 7 | 8 |
|-------------------------------------|---|---|--|
| Schlagwörter | Gleichzeitigkeit – Präparation – gleichzeitige Klicks - ... | Dunkelrauschen – Präparation – gleichzeitige Klicks – Einzelphotonenexperiment bei Alice | Frequenz – Zählrate – Einheit Hertz – Zahl der Klicks pro Sekunde - ... |
| 0 Punkte | Kein Schlagwort genannt / falscher Zusammenhang | Kein Schlagwort genannt / falscher Zusammenhang | Kein Schlagwort genannt / falscher Zusammenhang |
| 1 Punkt | <u>UND</u> : gleichzeitige Klicks bei zwei Detektoren | <u>UND</u> : Klick bei Trigger kündigt Photon bei Alice an | <u>UND</u> : Frequenz |
| 2 Punkte | <u>UND</u> : gleichzeitige Klicks bei mindestens zwei Detektoren | <u>UND</u> : Experimentiere bei Bob mit Einzelphoton im Falle von Koinzidenz <u>ODER</u> : Diskriminierung von Photonen vor dem Dunkelrauschen | <u>UND</u> : Frequenz = Zählrate oder Frequenz = Zahl der Klicks pro Sekunde <u>UND</u> : Einheit Hertz oder 1/s. |

Kodierleitfaden für Teil 3 – Antikorrelation am halbdurchlässigen Spiegel

(FF5 c)

Zum Themenbereich „Antikorrelation am halbdurchlässigen Spiegel“ gehören die folgenden Fragen des dritten Teils der Interviews:

9. Beschreibe einmal ein Experiment, mit dem man die Unteilbarkeit von Photonen finden kann.
10. Was bedeutet der Begriff Triplekoinzidenz und warum ist diese Größe im Experiment zur Unteilbarkeit entscheidend?
11. Erinnere dich einmal an den Faktor α . Kannst du dich erinnern, warum dieser Faktor interessant war?
12. Welchen Quanteneffekt hat man, wenn man $\alpha = 0$ misst?

Kodierleitfaden:

| Fragen zu Antikorrelation | 9 | 10 | 11 |
|---------------------------|--|--|---|
| Schlagwörter | Strahlteilerwürfel – reflektierter/transmittierter Ausgang – Koinzidenzrate - Triplekoinzidenzen | Dunkelrauschen – Teilbarkeit des Photons – Messfehler (?) - ... | Stochastische Unabhängigkeit – Prozentsatz – Prozentwert – Grundwert – Verhältnis – Maß für Wahrscheinlichkeit für Auftreten von Triplekoinzidenzen - ... |
| 0 Punkte | Kein Schlagwort genannt / falscher Zusammenhang | Kein Schlagwort genannt / falscher Zusammenhang | Kein Schlagwort genannt / falscher Zusammenhang |
| 1 Punkt | <u>UND</u> : Koinzidenzexperiment um Strahlteilerwürfel erweitern | <u>UND</u> : Rate gleichzeitiger Ereignisse an allen drei Detektoren | <u>UND</u> : Abgeleitet aus der Annahme der Unabhängigkeit und der Prozentgleichung <u>ODER</u> : Verhältnis zwischen Triple- zu „Doppel“-Koinzidenzen |
| 2 Punkte | <u>UND</u> : Koinzidenzrate zwischen R und T mit Triggerdetektor | <u>UND</u> : Entscheidend für (Un-)Teilbarkeit des Photons <u>ODER</u> : $N_{RTB} \ll N_{RB}, N_{TB}$ | <u>UND</u> : Unterscheidung Quantenlicht und klassisches Licht <u>ODER</u> : Wertetabelle in der Übersicht |

**Fragen zu
Antikorrelation**

12

Schlagwörter

Antikorrelation – Unteilbarkeit - ...

0 Punkte

Kein Schlagwort genannt / falscher Zusammenhang

1 Punkt

UND: Zahl der Triplekoinzidenzen wohl zufällig / Unteilbarkeit

ODER: Rate der Triplekoinzidenzen = 0

2 Punkte

UND: Antikorrelation von Quantenlicht am halbdurchlässigen Spiegel

Literaturverzeichnis

- [1] AINSWORTH, S.: DeFT: A conceptual framework for considering learning with multiple representations. In: *Learning and Instruction* 16 (2006), S. 183–198
- [2] ALTMAN, D. G. ; BLAND, J. M.: Statistics notes: Absence of evidence is not evidence of absence. In: *BMJ: British Medical Journal* 11 (1995), Nr. 3, S. 485
- [3] ANDERSON, J. R.: ACT, a simple theory of complex cognition. In: *American Psychologist* 4 (1996), Nr. 51, S. 355–365
- [4] ANDERSON, L.W. (Hrsg.) ; KRATHWOHL, D. R. (Hrsg.): *A taxonomy for learning, teaching and assessing. A revision of Bloom's taxonomy of educational objectives*. New York : Longman, 2001
- [5] AUDRETSCH, J.: *Die sonderbare Welt der Quanten: eine Einführung*. Beck, 2008 (Beck'sche Reihe). – ISBN 9783406573514
- [6] AYENE, M. ; KRIEK, J. ; DAMTIE, B.: Wave-particle duality and uncertainty principle: Phenomenographic categories of description of tertiary physics studentsâ depictions. In: *Phys. Rev. ST. Phy. Edu. Res.* 7 (2011), S. 020113
- [7] BACKHAUS, K. ; ERICHSON, B. ; PLINKE, W. ; WEIBER, R.: *Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung*. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 2016
- [8] BADER, F.: *Eine Quantenwelt ohne Dualismus*. Schroedel Schulbuchverlag, 1996
- [9] BETHGE, T.: Empirische Untersuchungen über Schülervorstellungen zur Quantenphysik. In: *Vorträge Physikertagung, Deutsche Physikalische Gesellschaft, Fachausschuss Didaktik der Physik* (1988)
- [10] BITZENBAUER, P. ; MEYN, J.-P.: Quantenphysik g^2 reifbar unterrichten. In: *Plus Lucis* (2019), Nr. 3, S. 17–21
- [11] BITZENBAUER, P. ; MEYN, J.-P.: Evaluation eines Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik mit Einzelphotonenexperimenten - Ergebnisse einer Pilotstudie. In: HABIG, S. (Hrsg.): *Naturwissenschaftliche Kompetenzen in der Gesellschaft von morgen. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Wien 2019, 2020*, S. 487

- [12] BITZENBAUER, P. ; MEYN, J.-P.: Fostering students' conceptions about the quantum world - results of an interview study. In: *Progress in Science Education* (2020). – (eingereicht)
- [13] BITZENBAUER, P. ; MEYN, J.-P.: Inhaltsvalidität eines Testinstruments zur Erfassung deklarativen Wissens zur Quantenoptik. In: *PhyDidB - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung* (2020)
- [14] BITZENBAUER, P. ; MEYN, J.-P.: A new teaching concept on quantum physics in secondary schools. In: *Physics Education* 55 (2020), S. 055031. – (eingereicht)
- [15] BITZENBAUER, P. ; MEYN, J.-P.: Von Koinzidenzen zu Wesenszügen der Quantenphysik: Erste Ergebnisse einer summativen Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik. In: *PhyDidB - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung* (2020)
- [16] BLUMÖR, R.: *Schülerverständnisse und Lernprozesse in der elementaren Optik*. Essen: Westarp-Wissenschaften, 1993
- [17] BOONE, W. J. ; ROGAN, J.: Rigour in quantitative analysis: The promise of Rasch analysis techniques. In: *African Journal of Research in SMT Education* 9 (2005), Nr. 1, S. 25–38
- [18] *Kapitel Das Schülervorverständnis zu Elektronen*. In: BORMANN, M.: *Vorträge der DPG*. Giessen, 1986, S. 227–232
- [19] BORTZ, J. ; LIENERT, G.: *Kurzgefasste Statistik für die klinische Forschung. Leitfaden für die verteilungsfreie Analyse kleiner Stichproben*. Bd. 3. Auflage. Springer Verlag, 2008
- [20] BRACHNER, A. ; FICHTNER, R.: Quantenmechanik im Unterricht. In: *Physik und Didaktik* (1974), Nr. 2, S. 81–94
- [21] BRANNING, D. ; BECK, M.: An FPGA-based module for multiphoton coincidence counting. In: *Advanced Photon Counting Techniques VI* Bd. 8375 International Society for Optics and Photonics, 2012
- [22] BRANNING, D. ; BHANDARI, S. ; BECK, M.: Low-cost coincidence-counting electronics for undergraduate quantum optics. In: *Am. J. Phys.* 77 (2009), S. 667
- [23] BRELL, C. ; SCHECKER, H. ; THEY, H. ; SCHUMACHER, D.: Computer trifft Realexperiment - besser lernen mit Neuen Medien? In: *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung* (2005)
- [24] BRELL, C. ; THEYSSEN, H.: Die Smiley-Skala - Ein effizientes Messinstrument für die Interessantheit des Unterrichts. In: *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht* 8 (2007), Nr. 60, S. 467–479

-
- [25] BRIDA, G. ; DEGIOVANNI, I. ; GENOVESE, M. ; MIGDALL, A. ; PIACENTINI, F. ; POLYAKOV, S. ; RUO BERCHERA, S.: Experimental realization of a low-noise heralded single-photon source. In: *Opt. Express* 19 (2011), Nr. 2, S. 1484–1492. <http://dx.doi.org/10.1364/OE.19.001484>. – DOI 10.1364/OE.19.001484
- [26] BRONNER, P.: *Quantenoptische Experimente als Grundlage eines Curriculums zur Quantenphysik des Photons*. Logos Verlag, 2010
- [27] BRONNER, P. ; STRUNZ, A.: *Aufbau eines quantenoptischen Experimentes - Detektoren und Datenauswertung*. <http://www.didaktik.physik.uni-erlangen.de/quantumlab/>. Version:2008. – zuletzt aufgerufen am 28.05.20
- [28] BRONNER, P. ; STRUNZ, A. ; SILBERHORN, A. ; MEYN, J.-P.: Interactive screen experiments with single photons. In: *European Journal of Physics* 30 (2009), feb, Nr. 2, 345-353. <https://doi.org/10.1088%2F0143-0807%2F30%2F2%2F014>
- [29] BRONNER, P. ; STRUNZ, A. ; SILBERHORN, C. ; MEYN, J.-P.: Experimenteller Nachweis der Existenz des Photons. In: *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung* (2008). ISBN 978-3-86541-317-8
- [30] BRONNER, P. ; STRUNZ, A. ; SILBERHORN, C. ; MEYN, J.-P.: Und er würfelt doch!
- Optische Experimente zum Quantenzufall. In: *Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule* 62 (2013), Nr. 1, S. 11–14. – ISSN 0177–8374; 1617–5689
- [31] BÜHNER, M.: *Einführung in die Test- und Fragebogenkonstruktion*. Pearson Studium, 2011
- [32] BÜHNER, M. ; ZIEGLER, M.: *Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler*. Pearson, 2009
- [33] BÜNING, H. ; TRENKLER, G.: *Nichtparametrische statistische Methoden*. Berlin New York : de Gruyter, 1994
- [34] BURDE, J.-P.: *Konzeption und Evaluation eines Unterrichtskonzepts zu einfachen Stromkreisen auf Basis des Elektronengasmodells*. Logos Verlag Berlin, 2018
- [35] BURDE, J.-P. ; WILHELM, T.: Akzeptanzbefragung zum Elektronengasmodell. In: *PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung 2015* (2015). <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/602>
- [36] BURDE, J.-P. ; WILHELM, T.: Erkenntnisse aus Teaching Experiments zum Elektronengasmodell. Version:2016. http://www.gdcp.de/images/tagungsbaende/GDCP_Band36.pdf. In: MAURER, C. (Hrsg.): *Authentizität und Lernen - das Fach in der Fachdidaktik*. Regensburg : Universität Regensburg, 2016 (Tagungsband zur Jahrestagung der Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik), 32-34
-

- [37] BURNHAM, Weinberg D. D.: Observation of simultaneity in parametric production of optical photon pairs. In: *Physical Review Letters* 25 (1970), Nr. 2, S. 84
- [38] CADMUS, R.: A video technique to facilitate the visualization of Physical Phenomena. In: *American Journal of Physics* 58 (1990), Nr. 4, S. 397–399
- [39] CATALOGLU, E. ; ROBINETT, R. W.: Testing the development of student conceptual and visualization understanding in quantum mechanics through the undergraduate career. In: *American Journal of Physics* 70 (2002), S. 238–251
- [40] CLAYTON, M. J.: Delphi: a technique to harness expert opinion for critical decision-making tasks in education. In: *Educational Psychology* 17 (1997), Nr. 4, S. 373–386
- [41] CLEFF, T.: *Deskriptive Statistik und Explorative Datenanalyse - Eine computergestützte Einführung mit Excel, SPSS und STATA*. Springer Gabler Verlag, 2015
- [42] COHEN, J.: *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. 2. New York : Lawrence Erlbaum Associates, 1988
- [43] CONNECT, DG: *The future is quantum: EU countries plan ultra-secure communication network*. <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/future-quantum-eu-countries-plan-ultra-secure-communication-network>. Version: 2019. – zuletzt aufgerufen am 26.04.20
- [44] COUTEAU, C.: Spontaneous parametric down-conversion. In: *Contemporary Physics* 59 (2018), Nr. 3, S. 291–304
- [45] COVA, S. ; GHIONI, M. ; LACAITA, A. ; SAMORI, C. ; ZAPPA, F.: Avalanche photodiodes and quenching circuits for single-photon detection. In: *Appl. Opt.* 35 (1996), Apr, Nr. 12, 1956–1976. <http://ao.osa.org/abstract.cfm?URI=ao-35-12-1956>
- [46] CRONBACH, L. J.: *Designing Evaluation of Educational and Social Programs*. Jossey-Bass, 1982
- [47] DEMTRÖDER, W.: *Experimentalphysik 4: Kern-, Teilchen- und Astrophysik*. Springer Verlag, 2013
- [48] DING, L. ; BEICHNER, R.: Approaches to data analysis of multiple-choice questions. In: *Phys. Rev. ST. Phys. Educ. Res.* 5 (2009), S. 020103. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.5.020103>. – DOI 10.1103/PhysRevSTPER.5.020103
- [49] DONHAUSER, A. ; BITZENBAUER, P. ; MEYN, J.-P.: Von Schnee- zu Elektronenlawinen: Entwicklung eines Erklärvideos zur Funktionsweise von Einzelphotonendetektoren. In: *PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung* (2020)

- [50] DÖRING, N. ; BORTZ, J.: *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler*. 4. Aufl. Berlin Heidelberg New York : Springer-Verlag, 2007. – ISBN 978–3–540–33306–7
- [51] DÖRING, N. ; BORTZ, J.: *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften*. Springer Spektrum, 2016
- [52] EINSTEIN, A.: Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. In: *Annalen der Physik* 322 (1905), Nr. 6
- [53] ERFMANN, Corinna: *Ein anschaulicher Weg zum Verständnis der elektromagnetischen Induktion - Evaluation eines Unterrichtsvorschlags und Validierung eines Leistungsdiagnoseinstruments*. Logos Verlag Berlin, 2017
- [54] ERICSSON, K. ; SIMON, H.: *Protocol Analysis. Verbal reports as data*. MIT Press, London, 1993
- [55] EU: *About the Quantum Flagship*. <https://qt.eu/about/>. Version: 2019. – zuletzt aufgerufen am 26.04.20
- [56] EU: *Quantum Flagship*. <https://qt.eu/>. Version: 2019. – zuletzt aufgerufen am 26.04.20
- [57] FELEKYAN, S. ; KÜHNEMUTH, R. ; KUDRYAVTSEV, V. ; SANDHAGEN, C. ; BECKER, W. ; SEIDEL, C.: Full correlation from picoseconds to seconds by time-resolved and time-correlated single photon detection. In: *Review of Scientific Instruments* 76 (2005), Nr. 8, 083104. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1946088>. – DOI 10.1063/1.1946088
- [58] FIELD, A.: *Discovering Statistics Using IBM SPSS*. 5. Sage Publications Ltd., 2017
- [59] FINKENBERG, F.: *Flipped Classroom im Physikunterricht*. Logos Verlag, 2018
- [60] FISSENI, H.: *Lehrbuch der psychologischen Diagnostik*. Göttingen : Hogrefe, 1997
- [61] FLATEBY, T. L.: *A Guide for Writing and Improving Achievement Tests*. https://www.academia.edu/27786842/A_Guide_for_Writing_and_Improving_Achievement_Tests. Version: 2013. – aufgerufen am 27.02.20
- [62] *Kapitel Triangulation*. In: FLICK, U.: *Qualitative Forschung in der Psychologie*. VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2010, S. 278–289
- [63] FOX, M.: *Quantum Optics: An Introduction*. OUP Oxford, 2006 (Oxford Master Series in Physics). – ISBN 9780191524257
- [64] GALVEZ, E. ; BECK, M.: Quantum optics experiments with single photons for undergraduate laboratories. In: *International Topical Meeting on Education and Training in Optics and Photonics*, 2007

- [65] GIUDICE, A.C. ; GHIONI, M. ; COVA, S. ; ZAPPA, F.: A process and deep level evaluation tool: afterpulsing in avalanche junctions. In: *ESSDERC '03. 33rd Conference on European Solid-State Device Research*. Estoril, Portugal, 2003, S. 347–350
- [66] GLUG, I.: *Entwicklung und Validierung eines Multiple-Choice-Tests zur Erfassung prozessbezogener naturwissenschaftlicher Grundbildung*. Kiel : IPN, 2009
- [67] GOLDHABER, S. ; POLLOCK, S. J. ; DUBSON, M. ; BEALE, P. ; PERKINS, K. K.: Transforming Upper-Division Quantum Mechanics: Learning Goals and Assessment. In: *Physics Education Research Conference 2009* Bd. 1179, 2009 (PER Conference), S. 145–148
- [68] GÖRITZ, G. ; WIESNER, H.: Wie verstehen die Schüler die Probleme der Quantenmechanik. In: *Praxis der Naturwissenschaften - Physik* 33 (1984), Nr. 3, S. 90–92
- [69] GRANGIER, P. ; ROGER, G. ; ASPECT, A.: Experimental evidence for a photon anticorrelation effect on a beam splitter: a new light on single-photon interferences. In: *Europhysics Letters* 1 (1986), Nr. 4, S. 173
- [70] GRAVETTER, F. J. ; WALLNAU, L. B.: *Statistics for the Behavioral Sciences*. 9. Belmont : Wadsworth, Cengage Learning, 2013
- [71] HAAGEN-SCHÜTZENHÖFER, C.: *Lehr- und Lernprozesse im Anfangsoptikunterricht der Sekundarstufe I*. Habilitationsschrift. Universität Wien, 2016
- [72] HAAGEN-SCHÜTZENHÖFER, C. ; ROTTENSTEINER, J. ; HOPF, M.: Akzeptanzbefragung zu Optikunterrichtsmaterialien. Version: 2013. http://www.gdcp.de/images/tagungsbaende/GDCP_Band33.pdf. In: BERNHOLT, Sascha (Hrsg.): *Inquiry-based Learning - Forschendes Lernen*. Kiel : IPN-Verlag, 2013 (Tagungsband zur Jahrestagung der Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik). – ISBN 978–3–89088–360–1, 431–433
- [73] HÄDER, M.: *Delphi-Befragungen: ein Arbeitsbuch*. VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2009
- [74] *Kapitel Validität*. In: HARTIG, J. ; FREY, A. ; JUDE, N.: *Testtheorie und Fragebogenkonstruktion*. Springer Berlin Heidelberg, 2012, S. 143–171
- [75] HARTIG, J. ; FREY, A. ; JUDE, N.: Validität. In: MOOSBRUGGER, H. (Hrsg.) ; KELAVA, A. (Hrsg.): *Testtheorie und Fragebogenkonstruktion*. Heidelberg : Springer Springer Verlag, 2012, S. 143–171
- [76] HEDGELAND, H. ; DAWKINS, H. ; JORDAN, S.: Investigating male bias in multiple choice questions: contrasting formative and summative settings. In: *European Journal of Physics* 39 (2018), S. 055704
- [77] HELLER, K. ; PERLETH, C.: *Kognitiver Fähigkeitstest für 4. bis 12. Klassen, Revision: KFT 4-12+R*. Göttingen : Betz Test, 2000

-
- [78] HEMPHILL, J.: Interpreting the Magnitudes of Correlation Coefficients. In: *American Psychologist* 58(1) (2003), S. 78–79
- [79] HEUSLER, S.: *Einführung in das Konzept der DVD Quantendimensionen*. <https://www.klett.de/produkt/isbn/978-3-12-772611-4>, . – aufgerufen am 11.05.20
- [80] HEUSLER, S.: *Visualisierungen - ein Schlüssel zu moderner Physik in der Schule*. SCIENCeMOTION Publications, 2011
- [81] HEUSLER, S. ; UBBEN, M.: Modeling Spin. In: *European Journal of Physics* 39(6) (2018), S. 065405
- [82] HEUSLER, S. ; UBBEN, M.: A Haptic Model of Entanglement, Gauge Symmetries and Minimal Interaction Based on Knot Theory. In: *Symmetry* 11(11) (2019), S. 1399ff
- [83] HOFFMANN, L. ; HÄUSSLER, P.: *Die IPN-Interessensstudie*. Kiel : IPN, 1998
- [84] HOLBROOK, J. ; RANNIKMAE, M.: The meaning of scientific literacy. In: *International Journal of Environmental Science Education* 42 (2009), Nr. 4, S. 391–398
- [85] HONG, C. K. ; MANDEL, L.: Theory of parametric frequency down conversion of light. In: *Phys. Rev. A* 31 (1985), Apr, 2409–2418. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.31.2409>. – DOI 10.1103/PhysRevA.31.2409
- [86] *Kapitel Qualitative Interviews in der Sozialforschung. Ein Überblick*. In: HOPF, C.: *Handbuch Qualitative Sozialforschung. Grundlagen, Konzepte, Methoden und Anwendungen*. Weinheim : Beltz Verlagsgruppe, 1995, S. 177–185
- [87] HUBBER, P.: Year 12 students' mental models of nature of light. In: *Research in Science Education* 36 (2006), S. 419–439
- [88] HUBER, G. ; MANDL, H.: *Verbale Daten*. Beltz Verlagsgruppe, 1994
- [89] IRESON, G.: A multivariate analysis of undergraduate physics students' conceptions of quantum phenomena. In: *European Journal of Physics* 20 (1999), S. 193–199
- [90] IRESON, G.: The quantum understanding of pre-university physics students. In: *Physics Education* 35 (2000), 01, S. 15. <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9120/35/1/302>. – DOI 10.1088/0031-9120/35/1/302
- [91] JENSSEN, L. ; DUNEKACKE, S. ; BLÖMEKE, S.: Qualitätssicherung in der Kompetenzforschung. In: *Zeitschrift für Pädagogik* (2015), Nr. 61, S. 11–31. – Beiheft 61
- [92] JUNG, W.: Probing acceptance, a technique for investigating learning difficulties. In: *Research in physics learning: Theoretical issues and empirical studies*. Kiel: IPN (1992), S. 278–295
-

- [93] KANE, M.: Validating the interpretations and uses of test scores. In: *Journal of Educational Measurement* 50 (2013), Nr. 1, S. 1–73
- [94] KARAN, S. ; AARAV, S. ; BHARADHWAJ, H. ; TANEJA, L. ; KULKARNI, G. ; JHA, A.: *Phase matching in Spontaneous Parametric Down Conversion*. 2018
- [95] KIMBLE, H. J. ; DAGENAIS, M. ; MANDEL, L.: Photon Antibunching in Resonance Fluorescence. In: *Phys. Rev. Lett.* 39 (1977), Sep, 691–695. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.39.691>. – DOI 10.1103/PhysRevLett.39.691
- [96] KIRSTEIN, J. ; HAASE, S. ; MÜHLENBRUCH, T. ; NORDMEIER, V.: 20 Jahre Interaktive Bildschirmexperimente - Von den Anfängen bis zu ELIXIER. In: *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung* (2016)
- [97] KIRSTEIN, J. ; NORDMEIER, V.: Multimedia representation of experiments in physics. In: *European Journal of Physics* 28 (2007), S. 115–126
- [98] *Kapitel Die Methode des Lauten Denkens*. In: KNOBLICH, G. ; ÖLLINGER, M.: *Handbuch der Allgemeinen Psychologie - Kognitionen*. Hogrefe, 2006, S. 691 – 696
- [99] KOCKELKORN, U.: *Lineare statistische Methoden*. München Wien : Oldenburg Verlag, 2000
- [100] KOHNLE, A.: Developing and evaluating animations for teaching quantum mechanics concepts. In: *European Journal of Physics* 31 (2010), Nr. 6, S. 1441
- [101] KOHNLE, A.: Interactive simulations for quantum physics and quantum information. In: *Praxis der Naturwissenschaften* (2016)
- [102] KOMOREK, M. ; DUIT, R.: The teaching experiment as a powerful method to develop and evaluate teaching and learning sequences in the domain of non linear systems. In: *International Journal of Science Education* 26 (2004), Nr. 5, 619-633. <https://doi.org/10.1080/09500690310001614717>
- [103] *Kapitel Lautes Denken*. In: KONRAD, K.: *Handbuch Qualitative Forschung in der Psychologie*. VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2010, S. 476–490
- [104] KRAL, A. ; THEIS, C. ; SCHORN, B. ; HEINKE, H.: Praxistauglicher Einstieg in die Quantenphysik mit Realexperimenten. In: *Implementation fachdidaktischer Innovation im Spiegel von Forschung und Praxis* (2016), S. 400
- [105] *Kapitel Das Interessenkonstrukt*. Bestimmungsmerkmale der Interessenhandlung und des individuellen Interesses aus der Sicht einer Person-Gegenstands-Konzeption. In: KRAPP, A.: *Interesse, Lernen, Leistung. Neuere Ansätze einer pädagogisch-psychologischen Interessenforschung*. Aschendorff, 1992, S. 297–329
- [106] KREBS, R.: Multiple Choice Fragen? - Ja, aber richtig. In: *Medizinische Fakultät; Institut für Medizinische Lehre IML; Abteilung für Assessment- und Evaluation AAE* (2008)

- [107] KRIJTENBURG-LEWERISSA, K. ; POL, H. ; BRINKMAN, A. ; JOOLINGEN, W. van: Insights into teaching quantum mechanics in secondary and lower undergraduate education. In: *Physical Review Physics Education Research* 13 (2017), 02. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.13.010109>. – DOI 10.1103/PhysRevPhysEducRes.13.010109
- [108] KRIJTENBURG-LEWERISSA, K. ; POL, H. ; BRINKMANN, A. ; JOOLINGEN, W. van: Key topics for quantum mechanics at secondary schools: a Delphi study into expert opinions. In: *International Journal of Science Education* (2018)
- [109] KRÜGER, D. ; PARCHMANN, I. ; SCHECKER, H.: *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*. Springer, 2014
- [110] KÜBLBECK, J. ; MÜLLER, R.: *Die Wesenszüge der Quantenphysik: Modelle, Bilder, Experimente*. Aulis-Verlag Deubner, 2003 (Praxis-Schriftenreihe / Abteilung Physik). – ISBN 9783761425060
- [111] KUHN, W.: *Ideengeschichte der Physik. Eine Analyse der Entwicklung der Physik im historischen Kontext*. 2. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 2016
- [112] KULGEMEYER, C.: *Physikalische Kommunikationskompetenz. Modellierung und Diagnostik*. Logos Verlag Berlin, 2010
- [113] KULGEMEYER, C.: A Framework of Effective Science Explanation Videos Informed by Criteria for Instructional Explanations. In: *Research in Science Education* (2018), 11. <http://dx.doi.org/10.1007/s11165-018-9787-7>. – DOI 10.1007/s11165-018-9787-7
- [114] KULGEMEYER, C.: Towards a framework for effective instructional explanations in science teaching. In: *Studies in Science Education* 54 (2018), Nr. 2, 109-139. <http://dx.doi.org/10.1080/03057267.2018.1598054>. – DOI 10.1080/03057267.2018.1598054
- [115] KULGEMEYER, C.: Qualitätskriterien zur Gestaltung naturwissenschaftlicher Erklärvideos. In: MAURER, C. (Hrsg.): *Tagungsband zur Jahrestagung der Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik*. Universität Regensburg, 02 2019, S. 285–288
- [116] KULGEMEYER, C. ; PETERS, C.: Exploring the explaining quality of physics online explanatory videos. In: *European Journal of Physics* 37 (2016), 09, S. 1–14. <http://dx.doi.org/10.1088/0143-0807/37/6/065705>. – DOI 10.1088/0143-0807/37/6/065705
- [117] KULTUSMINISTERKONFERENZ: *Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss*. Dezember 2004
- [118] LANDIS, J. ; KOCH, G.: The Measurement Of Observer Agreement For Categorical Data. In: *Biometrics* 33 (1977), 04, S. 159–74. <http://dx.doi.org/10.2307/2529310>. – DOI 10.2307/2529310

- [119] LEDERMAN, N. ; ABD-EL-KHALICK, F. ; BELL, R. ; SCHWARTZ, R.: Views of Nature of Science Questionnaire: Toward Valid and Meaningful Assessment of Learners' Conceptions of Nature of Science. In: *Journal of Research in Science Teaching* 39 (2002), 07, S. 497 – 521. <http://dx.doi.org/10.1002/tea.10034>. – DOI 10.1002/tea.10034
- [120] LICHTFELDT, M. ; WISSENSCHAFTEN, Westarp (Hrsg.): *Schülervorstellungen in der Quantenphysik und ihre möglichen Veränderungen durch Unterricht*. 1991
- [121] LICHTFELDT, M.: *Schülervorstellungen in der Quantenphysik und ihre möglichen Veränderungen durch Unterricht*. Essen : Westarp Wissenschaften, 1992
- [122] LÖHE, J.: *Angehörigenpflege neben dem Beruf*. Wiesbaden : Springer Fachmedien, 2017
- [123] LOUDON, Rodney: *The quantum theory of light*. OUP Oxford, 2000
- [124] M., Schumacher ; H., Wiesner: Erprobung des Potentialansatzes in der Elektrizitätslehre in Form einer Akzeptanzbefragungssequenz. In: *Vorträge Physikertagung, Deutsche Physikalische Gesellschaft, Fachausschuss Didaktik der Physik* Tagung 1996 (1997), S. 573–578. – ISSN 1430–564X
- [125] MACKENSEN-FRIEDRICHS, I.: *Förderung des Expertiseerwerbs durch das Lernen mit Beispielaufgaben im Biologieunterricht der Klasse 9*. Dissertation. Christian-Albrechts-Universität Kiel, 2004
- [126] MALGIERI, M. ; DE AMBROSIS, A. ; ONORATO, P.: What is Light? Form Optics to Quantum Physics Through the Sum over Paths Approach. In: *Conference Paper* (2015)
- [127] MANNILA, K. ; KOPONEN, I. ; NISKANEN, J.: Building a picture of students' conceptions of wave- and particle-like properties of quantum entities. In: *European Journal of Physics* 23 (2002), S. 45–53
- [128] MARSHMAN, E. ; SING, C.: Investigating and improving student understanding of quantum mechanics in the context of single photon interference. In: *Phys. Rev. Phys. Edu. Res.* 13 (2017), S. 010117
- [129] MARSHMAN, E. ; SINGH, C.: Validation and administration of a conceptual survey on the formalism and postulates of quantum mechanics. In: *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.* 15 (2019), Sep, 020128. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.15.020128>. – DOI 10.1103/PhysRevPhysEducRes.15.020128
- [130] *Kapitel Optoelektronik*. In: MARTIN, R.: *Elektronik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Springer Verlag, 2014, S. 303–375
- [131] MASSHADI, A. ; WOOLNOUGH, B.: Insights into students' understanding of quantum physics: visualizing quantum entities. In: *European Journal of Physics* 20 (1999), S. 511–516

- [132] *Kapitel* Formative Evaluation von eLearning: Grundlagen und Anwendungsbeispiele. In: MAYER, H. ; KRIZ, W.: *Evaluation von eLearnprozessen*. Oldenburg Verlag, 2010, S. 39–60
- [133] MAYRING, P.: Qualitative Inhaltsanalyse. In: *Handbuch qualitative Forschung in der Psychologie*. Springer, 2010, S. 601–613
- [134] MAYRING, P.: *Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlage und Techniken*. Beltz Verlagsgruppe, 2010
- [135] MCGOUGH, J. J. ; FARAONE, S. V.: Estimating the Size of Treatment Effect - Moving Beyond P Values. In: *Psychiatry (Edgmont)* 10 (2009), Nr. 6, S. 21–29
- [136] MCKAGAN, S. B. ; PERKINS, K. K. ; WIEMAN, C. E.: Design and validation of the Quantum Mechanics Conceptual Survey. In: *Physical Review Special Topics - Physics Education Research* 6 (2010), Nov, Nr. 2, 020121. <http://dx.doi.org/10.1103/physrevstper.6.020121>. – DOI 10.1103/physrevstper.6.020121. – ISSN 1554–9178
- [137] MEINHARDT, C.: *Entwicklung und Validierung eines Testinstruments zu Selbstwirksamkeitserwartungen von (angehenden) Physiklehrkräften in physikdidaktischen Handlungsfeldern*. Logos Verlag Berlin, 2018
- [138] MIKELSKIS-SEIFERT, S. ; THIELE, M. ; WÜNSCHER, T.: Modellieren - Schlüsselfähigkeiten für physikalische Forschungs- und Lernprozesse. In: *Physik und Didaktik in Schule und Hochschule* 1/4 (2005), S. 30–45
- [139] MIYAMOTO, S. ; SUZUKI, S. ; TAKUMI, S.: Clustering in Tweets Using a Fuzzy Neighborhood Model. In: *IEEE World Congress on Computational Intelligence* (2012)
- [140] *Kapitel* Selbstkonzept. In: MÖLLER, J. ; TRAUTWEIN, U.: *Pädagogische Psychologie*. Springer Medizin Verlag Heidelberg, 2009, S. 179–203
- [141] MOOSBURGER, H. ; KELAVA, A.: *Testtheorie und Fragebogenkonstruktion*. Springer Verlag, 2012
- [142] MORAGA-CALDERON, T. ; BUSIMAN, H. ; CRAMER, J.: The relevance of learning quantum physics from the perspective of the secondary school student: A case study. In: *European Journal of Science and Mathematics Education* 8 (2020), Nr. 1, S. 32–50
- [143] MÜLLER, R.: *Quantenphysik in der Schule*. Logos Verlag, 2003
- [144] MÜLLER, R.: Die Quantenphysik im Spannungsfeld zwischen Fachlichkeit, empirischer Forschung und Schulpraxis. In: *GDCP Tagungsband* 36 (2015), S. 13–24
- [145] MÜLLER, R.: *Qualitative Quantenphysik - Eine Handreichung für die Sekundarstufe I*. Physik im Kontext â Ein Programm zur Förderung der naturwissenschaftlichen Grundbildung durch Physikunterricht. <http://www.schul-physik>.

- de/downloads/Quantenphysik_piko.pdf. Version:o.J.. – abgerufen am 28.01.2020
- [146] MÜLLER, R. ; WIESNER, H.: Teaching quantum mechanics on an introductory level. In: *American Journal of Physics* 70 (2002), S. 200–209
- [147] MÜLLER-WALDECK, R.: *p-Wert und Konfidenzintervalle richtig interpretieren*. Ärztliches Journal. http://www.aerztliches-journal.de/fileadmin/user_upload/news/medizin/Studien_verstehen/1_p-Wert_Konfidenzintervall.pdf. Version:o.J.. – aufgerufen am 09.03.2020
- [148] MUMMENDEY, H. D. ; GRAU, I.: *Die Fragebogen-Methode: Grundlagen und Anwendungen in Persönlichkeits-, Einstellungs- und Selbstkonzeptforschung*. Göttingen : Hogrefe, 2014
- [149] *Kapitel Leitfadengestützte Interviews*. In: NIEBERT, K. ; GROPENGIESSER, H.: *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*. Springer Berlin Heidelberg, 2014, S. 121–132
- [150] NIEDDERER, H. ; KIEL, IPN (Hrsg.): *Atomphysik mit anschaulichem Quantenmodell*. Quantenphysik in der Schule. Fischler, H., 1992
- [151] NITKO, A. J.: *Educational tests and measurement: An introduction*. New York : Harcourt College Pub, 1983. – ISBN 978–0155209107
- [152] NOBELPRIZE.ORG: *The Noble Prize in Physics 1954*. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1954/summary/>. – aufgerufen am 03.02.2020
- [153] O.A.: *Zusammenfassung der APA-Normen zur Gestaltung von Manuskripten*. https://www.gillesdutilh.com/BAmaterials/Zusammenfassung_APA.pdf. Version: August 2007
- [154] OKADA, K.: Is omega squared less biased? A comparison of three major effect size indices in one-way ANOVA. In: *Behaviormetrika* 40(2) (2013), S. 129–147. <http://dx.doi.org/10.2333/bhmk.40.129>. – DOI 10.2333/bhmk.40.129
- [155] OLSEN, R.: Introducing quantum mechanics in the upper secondary school: A study in Norway. In: *International Journal of Science Education* 24 (2002), Nr. 6, 565-574. <http://dx.doi.org/10.1080/09500690110073982>. – DOI 10.1080/09500690110073982
- [156] OSBORNE, J. ; COLLINS, S. ; RATCLIFFE, M. ; MILLAR, R. ; DUSCHL, R.: What ideas-about-science should be taught in school science? A Delphi study of the expert community. In: *Journal of Research in Science Teaching* 40 (2003), Nr. 7, 692-720. <http://dx.doi.org/10.1002/tea.10105>. – DOI 10.1002/tea.10105
- [157] ÖZCAN, Ö.: Investigating students' mental models about the nature of light in different contexts. In: *European Journal of Physics* 36 (2015), S. 065042

- [158] PEARSON, B. ; JACKSON, D.: A hands-on introduction to single photons and quantum mechanics for undergraduates. In: *American Journal of Physics* 78 (2010), Nr. 5, 471-484. <http://dx.doi.org/10.1119/1.3354986>. – DOI 10.1119/1.3354986
- [159] POSNER, G.-J. ; STRIKE, K.-A. ; HEWSON, P.-W. ; GERTZOG, W.-A.: Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. In: *Science Education* 66 (1982), S. 211–227. <http://dx.doi.org/10.1002/sce.3730660207>. – DOI 10.1002/sce.3730660207
- [160] POSPIECH, G. ; SCHORN, B.: Der Quantencomputer in der Schule. In: *Praxis der Naturwissenschaft - Physik in der Schule* 65 (2016), S. 5–10
- [161] PRIEMER, B.: Deutschsprachige Verfahren der Erfassung von epistemologischen Überzeugungen. In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 12 (2006), S. 159–175
- [162] RANSTAM, J.: Why the P-value culture is bad and confidence intervals a better alternative. In: *Osteoarthritis and Cartilage* 20 (2012), Nr. 8, S. 805 – 808. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.joca.2012.04.001>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.joca.2012.04.001>. – ISSN 1063–4584
- [163] RASCH, B. ; FRIESE, M. ; HOFMANN, W. ; NAUMANN, E.: *Quantitative Methoden 1*. Heidelberg : Springer Medizin Verlag, 2006
- [164] RASCH, B. ; FRIESE, M. ; HOFMANN, W. ; NAUMANN, E.: *Quantitative Methoden. Einführung in die Statistik Band 2*. Springer Verlag, 2006
- [165] RAVED, L. ; ASSARAF, O. B.: Attitudes towards Science Learning among 10th Grade Students: A qualitative look. In: *International Journal of Science Education* 33 (2011), Nr. 9, S. 1219–1243
- [166] RIESE, J. ; REINHOLD, P.: Entwicklung eines Leistungstests für fachdidaktisches Wissen. In: KRÜGER, D. (Hrsg.) ; SCHECKER, H. (Hrsg.) ; PARCHMANN, I. (Hrsg.): *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*. Springer Verlag, 2014, Kapitel Entwicklung eines Leistungstests für fachdidaktisches Wissen, S. 257–267
- [167] ROBBINS, N. ; HEIBERGER, R.: Plotting Likert and other rating scales. In: *Proceedings of the 2011 Joint Statistical Meeting*, 2011, S. 1058–1066
- [168] ROHRMANN, B.: Empirische Studien zur Entwicklung von Antwortskalen für die sozialwissenschaftliche Forschung. In: *Zeitschrift für Sozialpsychologie* 9 (1978), S. 222–245
- [169] ROST, D. H.: *Handwörterbuch Pädagogische Psychologie*. Weinheim, Basel : Beltz Verlagsgruppe, 2010

- [170] ROST, J.: Allgemeine Standards für die Evaluationsforschung. In: HAGER, W. (Hrsg.) ; PATRY, J.-L. (Hrsg.) ; BREZING, H. (Hrsg.): *Evaluation psychologischer Interventionsmassnahmen. Standards und Kriterien: ein Handbuch*. 1. Verlag Hans Huber, 2000, S. 129–140
- [171] ROST, J.: *Lehrbuch Testtheorie - Testkonstruktion*. Verlag Hans Huber, 2004
- [172] SADAGHIANI, H. ; POLLOCK, S. J.: Quantum mechanics concept assessment: Development and validation study. In: *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.* 11 (2015), Mar, 010110. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.11.010110>. – DOI 10.1103/PhysRevSTPER.11.010110
- [173] *Kapitel* Lautes Denken - die Analyse von Denk-, Lern- und Problemlöseprozessen. In: SANDMANN, A.: *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*. Springer Spektrum, 2014, S. 179–188
- [174] *Kapitel* Überprüfung der Konsistenz von Itemgruppen mit Cronbachs α . In: SCHECKER, H.: *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*. Springer, 2014
- [175] SCHECKER, H. (Hrsg.) ; WILHELM, T. (Hrsg.) ; HOPF, M. (Hrsg.) ; DUIT, R. (Hrsg.): *Schülervorstellungen und Physikunterricht*. Springer Verlag, 2018
- [176] SCHERMELLEH-ENGEL, K. ; MOOSBRUGGER, H. ; MÜLLER, H.: Evaluating the fit of structural equation models: tests of significance and descriptive Goodness-of-Fit measures. In: *Methods of Psychological Research Online* 8 (2003), Nr. 2, S. 23–74
- [177] *Kapitel* Validität - Misst mein Test, was er soll? In: SCHMIEMANN, P. ; LÜCKEN, M.: *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*. Springer Verlag, 2014, S. 107–118
- [178] SCHNEIDER, J. ; MEYN, J.-P.: Modellexperimente zur Quantenkryptographie. In: *Praxis der Naturwissenschaft - Physik in der Schule* 65 (2016), S. 36–39
- [179] SCHNEIDER, W. ; SCHLAGMÜLLER, M. ; ENNEMOSER, M. ; HASSELHORN, M. (Hrsg.) ; SCHNEIDER, W. (Hrsg.) ; TRAUTWEIN, U. (Hrsg.): *LGTV 5-12+ - Lesegeschwindigkeits- und Verständnistest für die Klassen 5-12+*. Hogrefe, 2017
- [180] SCHNELL, C.: Lautes Denken als qualitative Methode zur Untersuchung der Validität von Testitems - Erkenntnisse einer Studie zur Diagnose des ökonomischen Fachwissens von Schülerinnen und Schülern der Sekundarstufe I. In: *Zeitschrift für ökonomische Bildung* (2016), Nr. 5, S. 26–49
- [181] SCHNOTZ, W.: Towards an Integrated View of Learning From Text and Visual Displays. In: *Educational Psychology Review* 14 (2002), 03, S. 101–120. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1013136727916>. – DOI 10.1023/A:1013136727916
- [182] SCHNOTZ, W. ; BANNERT, M.: Support and interference effects in learning from multiple representations. In: *European Conference on Cognitive Science* (1999), Oktober, S. 447–452

- [183] SCHÖDL, A.: *FALKO-Physik - Fachspezifische Lehrerkompetenzen im Fach Physik. Entwicklung und Validierung eines Testinstruments zur Erfassung des fachspezifischen Professionswissens von Physiklehrkräften*. Berlin : Logos Logos Verlag, 2017
- [184] SCHOLZ, R. ; FRIEGE, G. ; WEBER, K.-A.: Undergraduate experiments on statistical optics. In: *European Journal of Physics* 37 (2016), Nr. 5, S. 055302
- [185] SCHOLZ, R. ; WESSNIGK, S. ; WEBER, K.-A.: A Classical to Quantum Transition via Key Experiments. In: *European Journal of Physics* (2020)
- [186] *Kapitel Mixed Methods*. In: SCHREIER, M. ; ODAG, Ö.: *Handbuch Qualitative Forschung in der Psychologie*. VS Verlag VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2010, S. 263–277
- [187] SCHULZ, A.: *Experimentierspezifische Qualitätsmerkmale im Chemieunterricht*. Logos Verlag Berlin, 2011
- [188] SCHWAN, S. ; BUDER, J.: *Virtuelle Realität und E-Learning*. e-teaching.org. <https://www.e-teaching.org/didaktik/gestaltung/vr/vr.pdf>. Version: 2016. – aufgerufen am 03.02.2020
- [189] *Kapitel Die Methodologie der Evaluation*. In: SCRIVEN, M.: *Evaluation. Beschreibung und Bewertung von Unterricht, Curricula und Schulversuchen*. R. Piper & Co. Verlag, 1972, 60-91
- [190] SILBERER, G.: Die videgestützte Rekonstruktion kognitiver Prozesse beim Ladenbesuch. In: *ZFP - Journal of Research and Management* 27 (2005), Nr. 4, S. 263–271
- [191] SIMON, F.: *Der Einfluss von Betreuung und Betreuenden auf die Wirksamkeit von Schülerlaborbesuchen. Eine Zusammenhangsanalyse von Betreuungsqualität, Betreuermerkmalen und Schülerlaborzielen sowie Replikationsstudie zur Wirksamkeit von Schülerlaborbesuchen*. Logos Verlag, 2019
- [192] SIMONSOHN, G.: Die Probleme mit dem Photon im Physikunterricht. In: *Praxis der Naturwissenschaften* 9/30 (1981)
- [193] SINGH, C.: Student understanding of quantum mechanics. In: *American Journal of Physics* 69 (2001), S. 885–895
- [194] STAATSINSTITUT: *Fachprofil Physik*. <http://www.gym8-lehrplan.bayern.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/index.php?StoryID=26382>. Version: 2004
- [195] STADERMANN, K. ; VAN DEN BERG, E. ; GOEDHART, M.: Analysis of secondary school quantum physics curricula of 15 different countries: Different perspectives on a challenging topic. In: *Physical Review Physics Education Research* 15 (2019), 02. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.15.010130>. – DOI 10.1103/PhysRevPhysEducRes.15.010130

- [196] STEFFE, L. ; THOMPSON, P.: Teaching experiment methodology: Underlying principles and essential elements. In: LESH, R. (Hrsg.) ; KELLY, E. (Hrsg.): *Handbook of research design in mathematics and science education*. New York: Routledge, 2000, S. 267–306
- [197] STEIN, P. ; VOLLNHALS, S.: Grundlagen clusteranalytischer Verfahren. In: *Institut für Soziologie - Universität Duisburg-Essen* (2011)
- [198] STOETZER, M.-W.: *Regressionsanalyse in der empirischen Wirtschafts- und Sozialforschung - Eine nichtmathematische Einführung mit SPSS und Stata*. Springer Verlag, 2017
- [199] STRAUSS, T. ; MALTITZ, M. J.: Generalising Ward's Method for Use with Manhattan Distances. In: *PLoS ONE* 12(1): e0168288 (2017), Nr. 1. <http://dx.doi.org/doi:10.1371/journal.pone.0168288>. – DOI doi:10.1371/journal.pone.0168288
- [200] STRUNZ, A. ; MEYN, J.-P.: Experimentelle Quantenphysik im Physikunterricht. In: *Praxis der Naturwissenschaften, Physik* (2015)
- [201] SULLIVAN, G. M. ; FEINN, R.: Using Effect Size - or Why the P Value Is Not Enough. In: *Journal of Graduate Medical Education* 4 (2012), Nr. 3, 279-282. <http://dx.doi.org/10.4300/JGME-D-12-00156.1>. – DOI 10.4300/JGME-D-12-00156.1
- [202] *Kapitel* Alternative representations of instructional material. In: TABACHNECK, H. ; SIMON, H.: *Forms of Representation: An Interdisciplinary Theme for Cognitive Science*. Intellect Books, 1996, S. 28–46
- [203] TABER, K. S.: Learning quanta: Barriers to stimulating transitions in student understanding of orbital ideas. In: *Science Education* 89 (2004), S. 94–116
- [204] *Kapitel* Methodik von Vergleichsstudien zur Wirkung von Unterrichtsmedien. In: THEYSSEN, H.: *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*. Springer Berlin Heidelberg, 2014, S. 67–79
- [205] THEYSSEN, H. ; SCHECKER, H. ; NEUMANN, K. ; EICKHORST, B. ; DICKMANN, M.: Messung experimenteller Kompetenz - ein computergestützter Experimentier-test. In: *Physik und Didaktik in Schule und Hochschule* 1 (2016), Nr. 15, S. 26–48
- [206] THORN, J. ; NEEL, M. ; DONATO, V. ; BERGREEN, G. ; DAVIES, R. ; BECK, M.: Observing the quantum behavior of light in an undergraduate laboratory. In: *American Journal of Physics* 72 (2004), Nr. 9, 1210-1219. <http://dx.doi.org/10.1119/1.1737397>. – DOI 10.1119/1.1737397
- [207] UBBEN, M.: *Typisierung des Verständnisses mentaler Modelle mittels empirischer Datenerhebung am Beispiel der Quantenphysik*, Fachbereich Physik an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster, Diss., 2020

- [208] UBBEN, M. ; HEUSLER, S.: A haptic model of vibration modes in spherical geometry and its application in atomic physics, nuclear physics and beyond. In: *European Journal of Physics* 39(4) (2018), S. 045404
- [209] UBBEN, M. ; HEUSLER, S.: Gestalt and Functionality as independent dimensions of mental models in science. In: *Research in Science Education* (2019). <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1007/s11165-019-09892-y>. – DOI <https://doi.org/10.1007/s11165-019-09892-y>
- [210] UCCIO, S. di ; COLANTONIO, A. ; GALANO, S. ; MARZOLI, I. ; TRANI, F. ; TESTA, I.: Design and validation of a two-tier questionnaire on basic aspects in quantum mechanics. In: *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.* 15 (2019), Jun, 010137. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.15.010137>. – DOI 10.1103/PhysRevPhysEducRes.15.010137
- [211] VICTOR, A. ; ELSÄSSER, A. ; HOMMEL, G. ; BLETTNER, M.: Judging a Plethora of p-Values. In: *Dtsch. Ärztebl Int* 107(4) (2009), S. 50–56
- [212] WAHL, M. ; RAHN, H.-J. ; GREGOR, I. ; ERDMANN, R. ; ENDERLEIN, J.: Dead-time optimized time-correlated photon counting instrument with synchronized, independent timing channels. In: *Review of Scientific Instruments* 78 (2007), Nr. 3, 033106. <http://dx.doi.org/10.1063/1.2715948>. – DOI 10.1063/1.2715948
- [213] WALTNER, C. ; TOBIAS, V. ; WIESNER, H. ; HOPF, M. ; WILHELM, T.: Ein Unterrichtskonzept zur Einführung in die Dynamik in der Mittelstufe. In: *Praxis der Naturwissenschaften* (2010)
- [214] WEBER, K.-A.: *Quantenoptik in der Lehrerfortbildung - Ein bedarfsgeprägtes Fortbildungskonzept zum Quantenobjekt "Photon" mit Realexperimenten*, Universität Hannover, Diss., 2018
- [215] *Kapitel Die Methode des Lauten Denkens.* In: WEIDLE, R. ; WAGNER, A. C.: *Verbale Daten - Eine Einführung in die Grundlagen und Methoden der Erhebung und Auswertung.* Weinheim und Basel, 1982, S. 81–103
- [216] WEISE, G.: *Psychologische Leistungstests.* Göttingen : Hogrefe, 1975
- [217] WENTZEL, G.: About the theory of the photoelectrical effect. In: *Z. Phys.* 40 (1926), 01, S. 574–589. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01390456>. – DOI 10.1007/BF01390456
- [218] WIENER, G. ; SCHMELING, S. ; HOPF, M.: Akzeptanzbefragung mit 12-jährigen zum subatomaren Aufbau der Materie. Version: 2015. http://www.gdcp.de/images/tagungsbaende/GDCP_Band35.pdf. In: BERNHOLT, Sascha (Hrsg.): *Heterogenität und Diversität-Vielfalt der Voraussetzungen im naturwissenschaftlichen Unterricht.* Kiel : IPN, 2015 (Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik. 35. Jahrestagung 2014). – ISBN 978-3-89088-362-5, 450-452

- [219] WIENER, J. ; SCHMELING, S. ; HOPF, M.: The technique of probing acceptance as a tool for teachers' professional development: A PCK study. In: *Journal of Research in Science Teaching* (2018), S. 1–27. <http://dx.doi.org/10.1002/tea.21442>. – DOI 10.1002/tea.21442
- [220] WIESNER, H.: Verständnisse von Leistungskurschülern über Quantenphysik. In: *Physik in der Schule* 34 (1996), S. 95
- [221] WIESNER, H. ; WODZINSKI, R.: Akzeptanzbefragungen als Methode zur Untersuchung von Lernschwierigkeiten. In: *Lernen in den Naturwissenschaften* (1996), S. S. 250–274
- [222] WILSON, M.: *Constructing measures: an item response modeling approach*. Mahwah : Lawrence Erlbaum Associates, 2005
- [223] WINKELMANN, J.: *Auswirkungen auf den Fachwissenszuwachs und auf affektive Schülermerkmale durch Schüler- und Demonstrationsexperimente*. Logos Verlag Berlin, 2015
- [224] WUTTIPROM, S. ; SHARMA, M. D. ; JOHNSTON, I. D. ; CHITAREE, R. ; SO-ANKWAN, C.: Development and Use of a Conceptual Survey in Introductory Quantum Physics. In: *International Journal of Science Education* 31 (2009), Nr. 5, 631-654. <http://dx.doi.org/10.1080/09500690701747226>. – DOI 10.1080/09500690701747226
- [225] YANG, S. C.: Reconceptualizing think-aloud methodology: refining the encoding and categorizing techniques via contextualized perspectives. In: *Computers in Human Behavior* 19 (2003), Nr. 1, 95 - 115. [http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/S0747-5632\(02\)00011-0](http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/S0747-5632(02)00011-0). – DOI [https://doi.org/10.1016/S0747-5632\(02\)00011-0](https://doi.org/10.1016/S0747-5632(02)00011-0). – ISSN 0747–5632
- [226] ZHU, G. ; SINGH, C.: Surveying students' understanding of quantum mechanics in one spatial dimension. In: *American Journal of Physics* 80 (2012), Nr. 3, 252-259. <http://dx.doi.org/10.1119/1.3677653>. – DOI 10.1119/1.3677653
- [227] ZLOKLIKOVITS, S. ; HOPF, M.: Elektromagnetische Strahlung in der Sek. I unterrichten. In: *Tagungsband zur Jahrestagung der Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik*, 2019
- [228] ZOLLMAN, D. ; ESCALADA, L. ; GRABHORN, R.: Applications of interactive digital video in a physics classroom. In: *Journal of Educational Multimedia and Hypermedia* 5 (1996), Nr. 1, S. 73–97
- [229] ZOLLMAN, D. ; REBELLO, S. ; HOGG, K.: Quantum mechanics for everyone: Hands-on activities integrated with technology. In: *Am. J. Phys.* 70 (3) (2002)
- [230] ZÜRCH, Universität: *Mann-Whitney-U-Test*. https://www.methodenberatung.uzh.ch/de/datenanalyse_spss/unterschiede/zentral/mann.html. Version: 2018. – aufgerufen am 06.03.2020

- [231] ZÜRICH, Universität: *Multiple Regressionsanalyse*. https://www.methodenberatung.uzh.ch/de/datenanalyse_spss/zusammenhaenge/mreg.html. Version: 2018. – aufgerufen am 10.05.20
- [232] ZÜRICH, Universität: *Wilcoxon-Test*. https://www.methodenberatung.uzh.ch/de/datenanalyse_spss/unterschiede/zentral/wilcoxon.html. Version: 2018. – aufgerufen am 06.03.2020

Index

A

Akzeptanzbefragung, 68
ANOVA, 159
Anschlussfähigkeit, 57
Antikorrelation, 51
Antwort­sicherheit, 188
Aufgabengüte, 112
Auswerteelektronik, 56

C

χ^2 -Test, 164
Clusteranalyse, 166
Cronbach's α , 129

D

Delphi-Studie, 24
Detektionswahrscheinlichkeit, 62
Detektor, 46
Determinismus, 63
Diverging Stacked Bar Chart, 137
Doppelspaltexperiment, 214

E

Effektstärke, 162
Eigenschaft Ort, 222
Einzelphotoneninterferenz, 52
Einzelphotonenzustand, 48
Energieportion, 64
Erklärvideo, 59
Erlanger Unterrichtskonzept, 38
Expertenbefragung, 136

F

formative Evaluation, 68
Friedman-Test, 161

G

Gleichzeitigkeit, 56

H

halbdurchlässiger Spiegel, 51
Hybridmodell, 28

I

Inhaltsvalidität, 136
Interaktives Bildschirmexperiment, 45
Interviewstudie, 107
Itemschwierigkeit, 127

J

Justage, 56

K

Kategoriensystem, 164
Kerncurriculum, 22
klassisches Licht, 61
Klick, 60
Koinzidenzmessung, 60
konfirmatorische Faktorenanalyse, 133
Konstruktvalidität, 133
Kriteriumsvalidität, 133

L

Lautes Denken, 111
Lehrplan, 41
Lernendenvorstellungen, 28
Lernvoraussetzung, 43
Lichtquant, 64
Lokalisierbarkeit, 64

M

Mann-Whitney-U-Test, 158
Michelson-Interferometer, 64
Mixed-Methods-Design, 91
Modellfit, 133
multiple lineare Regression, 161

N

nichtlinearer Kristall, 47

P

Parametrische Abwärtskonversion, 47

Photon, 52

Pilotstudie, 123

Präparation, 48

Praxistauglichkeit, 33

p-Wert, 157

Q

qualitative Inhaltsanalyse, 164

Quantentechnologie, 35

Quantenwelt, 204

Quantenzufall, 63

Quantum Flagships, 15

R

Ratingskala, 156

S

Schneelawinenanalogie, 59

Semiklassisch, 26

Splithalf-Reliabilität, 129

Strukturmodell, 102

T

Teaching Experiments, 68

Teilchen, 28

Testwertinterpretation, 103

theoriegeleitetes Experiment, 49

Trajektorienvorstellungen, 29

Trennschärfe, 127

Triangulation, 92

Triplekoinzidenz, 61

t-Test, 157

U

Unterrichtskonzept, 31

V

φ -Koeffizient, 166

Verschränkung, 24

Vorstellungsfragebogen, 105

W

Wahrscheinlichkeitsinterpretation, 209

Wellenfunktionen, 25

Welle-Teilchen-Dualismus, 23

Wilcoxon-Test, 158

Z

Zielgruppe, 40

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 Haerberlen: 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 Metakzepten 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 nicht-linearen 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 Lehrerrepräsentation 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 quasixperimentelle 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 Maiseyenko: 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: Lese Geschichten 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 Finkenbergr: 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 Videovignetten-tests 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 Dörscheln: 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 Veränderung 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

Alle erschienenen Bücher können unter der angegebenen ISBN direkt online (<http://www.logos-verlag.de>) oder per Fax (030 - 42 85 10 92) beim Logos Verlag Berlin bestellt werden.

Studien zum Physik- und Chemielernen

Herausgegeben von Hans Niedderer, Helmut Fischler 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 in Deutschland.

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:

Prof. Dr. Hans Niedderer
Institut für Didaktik der Naturwissenschaften,
Abt. Physikdidaktik, FB Physik/Elektrotechnik,
Universität Bremen,
Postfach 33 04 40, 28334 Bremen
Tel. 0421-218 2484/4695, e-mail:
niedderer@physik.uni-bremen.de

Prof. Dr. Helmut Fischler
Didaktik der Physik, FB Physik, Freie Universität Berlin,
Arnimallee 14, 14195 Berlin
Tel. 030-838 56712/55966, e-mail:
fischler@physik.fu-berlin.de

Prof. Dr. Elke Sumfleth
Didaktik der Chemie,
Fachbereich Chemie,
Universität Duisburg-Essen,
Schützenbahn 70, 45127 Essen
Tel. 0201-183 3757/3761, e-mail:
elke.sumfleth@uni-essen.de

Die Quantenphysik bildet schon heute das Fundament zahlreicher aktueller Technologien. Zukünftige Quantentechnologien, wie Quantencomputer, werden sowohl in der Industrie als auch für die Gesellschaft an Bedeutung gewinnen.

In vielen nationalen und internationalen Schulcurricula ist die Quantenphysik als Thema für den Physikunterricht mittlerweile fest verankert. Aber trotz des enormen Bedeutungszuwachses von Quantentechnologien ist der Unterricht zur Quantenphysik an Schulen nach wie vor von semi-klassischen Modellen und quasi-historischen Zugängen geprägt, während moderne Begriffe der Quantenphysik häufig unberücksichtigt bleiben. Die Folge sind oft klassisch-mechanistisch geprägte Vorstellungen Lernender zur Quantenphysik.

Hier setzt diese Arbeit an: mit dem Erlanger Unterrichtskonzept zur Quantenoptik wird ein Konzept vorgestellt, mit dem Lernende der gymnasialen Oberstufe Quanteneffekte anhand quantenoptischer Experimente kennen lernen. Konzepte der Quantenoptik, wie die Präparation von Quantenzuständen, die Antikorrelation am Strahlteiler und die Einzelphotoneninterferenz verhelfen Lernenden zu einem modernen Bild über Quantenphysik. Im Rahmen einer summativen Evaluation im Mixed-Methods-Design mit 171 Schülerinnen und Schülern zeigte sich, dass Lernende mit dem Erlanger Unterrichtskonzept zu quantenphysikalisch dominierten Vorstellungen gelangen und verbreitete Lernschwierigkeiten vermieden werden können.

Logos Verlag Berlin

ISBN 978-3-8325-5123-0