

Judith Breuer

Quantenmechanik in der Lehramtsausbildung – Vorstellungen und Ziele von Hochschullehrenden

Zusammenfassung

Fachveranstaltungen im Lehramtsstudium Physik werden zumeist gemeinsam für Lehramts- und Fachstudierende angeboten. Somit steht die wissenschaftliche Ausbildung und weniger der Erwerb von Fachwissen als Grundlage für die Rekonstruktion von Fachinhalten für den schulischen Unterricht im Vordergrund. Tatsächlich haben viele (angehende) Lehrkräfte teilweise konzeptuelle Verständnisschwierigkeiten zum Thema Quantenmechanik auf Schulniveau. Daher stellt sich die Frage, inwieweit Lehramtsstudierende angemessen auf die besonderen Anforderungen der Schule zum Thema Quantenmechanik ausgebildet werden. Es werden zu dieser Problematik acht Hochschullehrende mittels halbstandardisierter Interviews befragt. Die Lehrenden schätzen die aktuelle Situation von gemeinsamen Veranstaltungen als gut realisierbar ein, wenngleich sich der Großteil für eine Trennung der Studierenden ausspricht. Obschon die meisten den Aufbau von qualitativem Verständnis als Kernaufgabe von Schule ansehen, stehen in ihren universitären Veranstaltungen primär mathematische Fertigkeiten im Fokus. Somit bleibt unklar, inwieweit den Befragten die Diskrepanz zwischen schulischen und universitären Zielen bewusst ist und wie die Universität ihrer Meinung nach darauf reagieren sollte.

Schlüsselwörter

Lehramtsstudium; Quantenmechanik; Interviewstudie; Vorstellung von Hochschullehrenden

Quantum Mechanics in Teacher Education – Conceptions and Goals of University Lectures

Abstract

Pre-service teachers normally attend their physics courses together with physics majors (B.Sc.). Therefore, the scientific perspective is more emphasized than gaining content knowledge for the reconstruction of subject matter for school. In fact, some (pre-service) teachers seem to have misconceptions about quantum mechanics at school level. Thus, it

is a moot question if physics courses at university prepare pre-service teachers well enough for the demands of teaching quantum mechanics at school. Regarding this question, eight university lectures are asked by semi-structured interviews. In their opinion, teaching pre-service teachers together with physics students is practicable but they appreciate separated courses. Although most of them underline a conceptual understanding as a main intention of school teaching, they focus on mathematical skills in their courses. Hence, it is unclear whether the participants are aware of the discrepancy in the aims of school and university teaching and how teacher education could deal with this problem.

Keywords

Teacher Education; Quantum Mechanics; Interviews; Conceptions of University Lectures

1 Einleitung

Quantenmechanik in der Schule zu unterrichten, birgt das didaktische Potential, Schüler*innen Einblicke in wissenschaftliche Forschungsprozesse und Anwendungsmöglichkeiten der modernen Physik wie bspw. Quantencomputer oder Lasertechnik zu ermöglichen. Bei allen anderen Themen der Schulphysik handelt es sich hingegen um bereits abgeschlossene Forschungsgebiete, weshalb die Quantenmechanik eine herausragende Rolle im Physikunterricht einnimmt. Allerdings stellt genau dieser Umstand auch eine fachliche Herausforderung für Physiklehrkräfte dar. So übersteigt der Mathematisierungsgrad der Quantenmechanik bei Weitem das schulische Niveau, weshalb in der Schule Inhaltsbereiche qualitativer Art zu grundlegenden quantenmechanischen Konzepten und Begriffen zur Reduktion des Komplexitätsgrads im Vordergrund stehen (Fischler 1992; Reinhold 2006).

Die bisherige Forschung liefert allerdings Hinweise dafür, dass viele Lehramtsstudierende – auch nach dem Besuch von Vorlesungen zur Quantenmechanik – konzeptuelle Verständnisschwierigkeiten zu diesem Thema haben (Müller und Wiesner 1997; Robertson und Kohnle 2009). Tatsächlich stellten Pospiech und Schöne (2012) eine Diskrepanz zwischen universitären und schulischen Inhaltsbereichen zur Quantenmechanik fest (vgl. Schöne 2018).

Lehramtsstudierende besuchen in der Regel Vorlesungen zum Thema Quantenmechanik mit Fachstudierenden gemeinsam, sodass eine wissenschaftliche und theoretische Beschreibung im Fokus steht. Das bedeutet, dass primär mathematische Rechenfertigkeiten erlernt werden. Die besonderen Bedürfnisse der Lehramtsausbildung, ein grundlegendes Verständnis für dieses abstrakte Thema zu vermitteln, können dabei kaum berücksichtigt werden (Fischler 1992).

Es ist somit fraglich, inwieweit angehende Lehrkräfte an der Universität auf die besonderen Anforderungen der Schule zum Thema Quantenmechanik vorbereitet werden. Vor diesem Hintergrund zielt das hier vorgestellte Forschungsvorhaben darauf ab, einen Beitrag zur fortwährenden Debatte der universitären Lehrerbildung, ob Lehramtsstudierende mit Fachstudierenden gemeinsam oder separat in Fachveranstaltungen ausgebildet werden sollen, zu leisten. Dazu wird exemplarisch am Hochschulstandort Paderborn untersucht, welche Vorstellungen Hochschullehrende der Quantenmechanik zu der aufgezeigten Problematik haben und mit welchen Schwierigkeiten sich diese konfrontiert sehen.

Auf Grundlage der Erkenntnisse sollen mögliche Verbesserungsvorschläge für die universitäre Lehrerbildung zur Quantenmechanik diskutiert (Huber, Pilniok, Sethe, Szczyrba und Vogel 2014) und im Rahmen der bestehenden Debatte zu den Zielen und Inhalten universitärer Lehrerbildung eingeordnet werden. Da diese Debatte auch in anderen Fachbereichen geführt wird (Merzyn 2004) und sogar auf den Stellenwert von Lehrerbildung an Hochschulen ausgeweitet werden kann, ist die in der vorliegenden Studie untersuchte Problemlage auch für andere Bereiche der Lehramtsausbildung von Bedeutung.

2 Ausgangslage

2.1 Quantenmechanik in der Schule

Quantenmechanik wird in der Sekundarstufe II sowohl im Grundkurs als auch im Leistungskurs unterrichtet. Es ist bedenklich, dass viele Schüler*innen auch nach der Behandlung von Quantenmechanik im Unterricht keine korrekten quantenmechanischen Vorstellungen haben (Müller, 2003; Krijtenburg-Lewerissa, Pol, Brinkmann und van Joolingen 2017). Stattdessen überwiegen mechanistische Vorstellungen, die den Alltagserfahrungen der Schüler*innen aus der makroskopischen Welt entspringen. Es wird bspw. häufig davon ausgegangen, dass klassisch wohldefinierte Eigenschaften wie Ort und Energie auch auf Quantenobjekte wie Elektronen oder Photonen übertragen werden können. Die Superposition von Zuständen wird dabei unterschlagen (Müller und Schecker 2018).

Vor dem Hintergrund dieser Problematik wird im weiteren Verlauf die didaktische Aufbereitung der Quantenmechanik für die Schule betrachtet, da in Anlehnung an das Angebots-Nutzungsmodell das bereitgestellte Lernangebot für den Lernerfolg der Schüler*innen entscheidend ist (Seidel 2014). Es wurden verschiedene Ansätze zum Unterrichten von Quantenmechanik in der Schule entwickelt, welche typische Fehlvorstellungen der Schüler*innen, wie die zuvor genannte Beibehaltung klassischer Denkweisen, berücksichtigen und den Fokus auf ein qualitatives Verständnis grundlegender Konzepte und Phänomene wie den photoelektrischen Effekt oder Aufenthaltswahrscheinlichkeiten richten (Reinhold 2006). Ein Ansatz ist, das Bohr'sche Atommodell in der Schule nicht zu behandeln, da es semiklassische Vorstellungen fördert, weil das Atommodell wie ein Planetensystem mit Elektronen auf festen Bahnen dargestellt wird (Niedderer 1992). Dieser Zugang wird allerdings kontrovers diskutiert (Fischler 1992). Eine Übersicht über die didaktischen Kontroversen und verschiedene Unterrichtsansätze zum Thema Quantenmechanik in der Schule liefern Fischler (1992), Müller (2003) und Weber (2018).

Zur didaktischen Aufbereitung des Themas sind aber auch bestimmte Kompetenzen der Lehrperson gefragt. Gerade das Thema Quantenmechanik ist für Physiklehrkräfte besonders herausfordernd zu unterrichten. Zum einen handelt es sich um ein aktuelles Forschungsgebiet; es wird bspw. nach einer Vereinbarkeit der Quantenmechanik mit der Gravitationskraft geforscht (z.B. Hossenfelder, Marletto und Vedral 2017; Tilloy 2019). Das bedeutet, dass es noch viele ungeklärte Fragen gibt und gleichzeitig immer wieder neue Forschungserkenntnisse gewonnen werden, die von Lehrkräften nachvollzogen werden müssen. Zum anderen unterscheidet sich die Quantenmechanik fundamental von der klassischen Physik – und da sich bereits die klassische Physik in vielen Fällen deutlich von der Alltagswelt der Schüler*innen unterscheidet, erhöht sich dadurch zusätzlich das Abstraktionsniveau, wodurch didaktische Schwierigkeiten wie die zuvor genannten Fehlvorstellungen hervorgerufen werden (Müller und Schecker 2018). Ferner übersteigt der quantenmechanische Formalismus die an der Schule behandelten mathematischen Inhalte, was eine Auswahl von Inhaltsbereichen qualitativer Art zur Reduktion des Komplexitätsgrads unabdingbar macht.

Folglich ist es zur Vermittlung grundlegender quantenmechanischer Konzepte offenkundig notwendig, dass Physiklehrkräfte selber über korrekte quantenmechanische Vorstellungen verfügen. Eine Befragung von 18 Studierenden für das Lehramt an Gymnasien im sechsten Semester nach dem Besuch von Lehrveranstaltungen zum Thema Quantenmechanik ergab jedoch, dass „in der überwiegenden Zahl der Fälle klassische Vorstellungen statt der korrekten quantenmechanischen dominieren“ (Müller und Wiesner 1997, 3). Robertson und Kohnle (2009) fanden ganz ähnliche Befunde auch für Fachstudierende. In einer Fragebogenstudie mit 174 britischen Physikstudierenden konnten sie große Schwierigkeiten im konzeptuellen Verständnis feststellen. Gut zwei Drittel der Stichprobe hatte zu dem Zeitpunkt bereits Quantenmechanik-Veranstaltungen an der Universität besucht.

Trotz der insgesamt recht dünnen Befundlage implizieren die bisherigen Forschungsergebnisse, dass die fachliche Ausbildung von Physiklehramtsstudierenden an der Universität nicht ausreicht, „um ein angemessenes quantenmechanisches Bild des Atoms zu vermitteln, mit dem begründete didaktische Entscheidungen gefällt werden können“ (Müller und Wiesner 1997, 3; vgl. Fischler 1992; Schöne 2018).

Daher drängt sich die Vermutung auf, dass auch ausgebildete Lehrkräfte teilweise Schwierigkeiten im fachlichen Verständnis von Quantenmechanik und somit in der Entwicklung eines didaktisch durchdachten Lernangebots haben. Zu den fachlichen Vorstellungen zur Quantenmechanik von Physiklehrkräften liegen allerdings kaum Untersuchungen vor. Es kann zumindest auf eine mangelnde Sensibilisierung der didaktischen Problematik mancher Physiklehrkräfte geschlossen werden, da in einer Befragung von 226 Physiklehrkräften 43% bzw. 26% Personen angaben, dass für sie in der Oberstufe die Behandlung klassischer Modellierungen für den Aufbau von Atomen und für die Gestalt von Elektronen als „kleine Kugeln mit festem Radius“ wichtig ist (Ubben und Heusler 2019, 478). Es bleibt allerdings unklar, wie diese Themen im Unterricht verankert werden, bspw. ob eine Diskussion der Tragweite klassischer Modelle stattfindet.

Da für den Erwerb fachlicher Kompetenzen der Lehrkräfte die universitäre Ausbildung zentral und grundlegend ist, soll im Folgenden das Fachstudium Physik zum Thema Quantenmechanik für Lehramtsstudierende näher betrachtet werden.

2.2 Die fachliche Ausbildung von Physiklehrkräften

In der Regel ist jeweils mindestens eine experimentelle und eine theoretische Vorlesung zum Thema Quantenphysik Bestandteil der deutschen universitären Lehramtsausbildung. Diese werden zumeist gemeinsam von Lehramts- und Fachstudierenden besucht. Aus einer bundesweiten Befragung von 24 Hochschullehrenden aus der theoretischen Physik zur Quantenmechanik lässt sich folgern, dass dabei die Vermittlung grundlegender Konzepte und mathematischer Fertigkeiten im Vordergrund steht (Schöne 2018). Seltener werden Interpretationsfragen behandelt. Dies deckt sich mit den Einschätzungen von Lehrveranstaltungen zur Quantenmechanik aus einer Befragung von 110 Lehramtsstudierenden (ebd.).

Für die Entwicklung eines Fachwissenstest zur Quantenmechanik für Studierende wurden an einer amerikanischen Universität Interviews mit acht Fakultätsmitgliedern durchgeführt, um Standardthemen der Quantenmechanik durch die Einschätzung von

Experten zu ermitteln. „However, the most important result of our faculty interviews is that there is not a faculty consensus about what should be taught in modern physics“ (McKagan, Perkins und Wiemann 2010, 3). Dieser mangelnde Konsens zentraler Themen der Quantenmechanik wurde ebenfalls bei einer Analyse verschiedener Lehrbücher festgestellt (ebd.).

Neben dem mangelnden Konsens auf universitärer Ebene wurde auch eine Diskrepanz zwischen schulischen und universitären Inhaltsbereichen identifiziert. Schulrelevante Themen wie der Compton-Effekt, der Photoeffekt oder der Welle-Teilchen-Dualismus werden selten in universitären Veranstaltungen thematisiert (Schöne 2018).

„Besonders deutlich wird die Diskrepanz zwischen Begriffen und Konzepten in Lehrplänen und in Vorlesungen bei dem Begriff der Verschränkung, den die Studierenden während ihres Studiums oft nicht kennenlernen. Eine weitere deutliche Diskrepanz zeigt sich in der erkenntnistheoretischen Einordnung, die in der Schule erwartet wird.“ (Pospiech und Schöne, 2012, 9)

Gleiches gilt auch für den Vergleich von Lehrplänen für die Schule und gängigen Lehrbüchern (Pospiech und Schöne 2012).

Jung (1983) argumentiert, dass zwar zur Anwendung formaler Theorien kein tieferes Verständnis notwendig sei, aber die Entwicklung von „bedeutungstiftenden Vorstellungen“ insofern wünschenswert ist, weil man nur so einschätzen kann, was eine Theorie leisten kann und ob es sich um ein vollständiges oder unvollständiges Problem handelt. Daher kritisiert Jung das reine Erlernen mathematischer Theorieapparate.

Riese (2010) fand Hinweise dafür, dass Fachwissen von Physiklehramtsstudierenden in die Dimensionen Schulwissen, vertieftes Schulwissen und universitäres Wissen eingeteilt werden kann. Demzufolge findet an der Universität primär die Vermittlung universitären Wissens statt, wobei unklar ist, „ob alle Lehramtsstudierenden tatsächlich den Transfer von abstraktem, oftmals hoch theoretischem Fachwissen auf schulnahes Wissen leisten können“ (Riese 2010, 30). Die Befunde von Enkrott, Buschhüter, Borowski und Fischer (2019) von mehr als 800 Physikstudierenden untermauern diese Einteilung des Fachwissens. Die empirischen Untersuchungen von Riese (2010) und Enkrott et al. (2019) legen allerdings den Schwerpunkt auf Fachwissen im Bereich Mechanik. Nichtsdestotrotz erscheint eine Übertragung auf das Inhaltsfeld Quantenmechanik plausibel. Tatsächlich geben die von Schöne (2018) befragten Lehramtsstudierenden an, dass sie sich den Transfer ihres an der Hochschule erworbenen Wissens zur Quantenmechanik auf Schulniveau zum Teil nicht zutrauen.

Aufgrund ähnlicher Feststellungen plädierte bereits 2006 die Deutsche Physikalische Gesellschaft für eine getrennte Ausbildung von Lehramts- und Fachphysikstudierenden (DPG 2006, 8):

„Das Lehramtsstudium muss wegen seiner ganz anderen Zielsetzung ein Studium *sui generis* sein. Es darf nicht wie bisher als ein verkürzter, abgebrochener oder ausgedünnter Teil der Ausbildung der Fachphysiker quasi nebenbei mitgeliefert werden.“

Aus organisatorischen und ressourcenbedingten Gründen wie geringen Studierendenzahlen wird dieser Vorschlag aber bislang nur für vereinzelte Veranstaltungen, nicht aber für den gesamten Studienverlauf an deutschen Universitäten umgesetzt.

Als Konsequenz steht bei der Themenwahl die Ausbildung der Fachstudierenden stärker im Zentrum, nicht zuletzt, weil den Hochschullehrenden dieser Blickwinkel selber vertrauter ist. Tatsächlich ist anzunehmen, dass die universitäre Lehre durch zugrundeliegende Vorstellungen der Hochschullehrenden geprägt ist (Riegler 2014). Demnach können die Vorstellungen zum Lehren und Lernen von Hochschullehrenden in drei Entwicklungsschritten beschrieben werden: 1) Lehre als Inhaltsvermittlung, wobei das Scheitern von Studierenden durch externe Faktoren wie bspw. mangelnde Motivation der Studierenden erklärt wird, 2) Lehre als Organisieren studentischer Aktivität, wobei das Scheitern auf mögliche Defizite der Lehrmethode zurückgeführt wird und 3) Lehre als Ermöglichen von Lernen, wobei ein Conceptual Change der Studierenden angestrebt wird (Ramsden 2003). Für das Erlangen der dritten Stufe müssen die Lehrenden ebenfalls einen Conceptual Change durchführen, was offenbar nur Wenigen gelingt, allerdings von Riegler (2014) als Voraussetzung gesehen wird, um Studierenden die Gelegenheit für einen kognitiven Konflikt zu geben.

Insgesamt lässt sich zusammenfassen, dass das Thema Quantenmechanik in der Schule aufgrund des hohen Abstraktionsgrads für Physiklehrkräfte eine große Herausforderung darstellt. Es liegen nur wenige Studien zum Verständnis zur Quantenmechanik von (angehenden) Physiklehrkräften vor und Untersuchungen aus anderen Ländern sind zudem aufgrund von Unterschieden im Bildungssystem auch nur eingeschränkt übertragbar. Nichtsdestotrotz zeichnet sich ab, dass Physiklehrkräfte teilweise Verständnisschwierigkeiten mit grundlegenden quantenmechanischen Konzepten haben, welche sie in der Schule den Schüler*innen vermitteln sollen. Zusammenfassend kann die Hypothese aufgestellt werden, dass diese qualitativen Verständnisschwierigkeiten (angehender) Physiklehrkräfte auf die Unterschiede in den universitären und schulischen Inhaltsbereichen zurückzuführen sind.

In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, wie sich Hochschullehrende bezüglich dieser Thematik positionieren, welche Vorstellungen zum Lehren und Lernen sowie welche fachlichen Vorstellungen zur Quantenmechanik dem zugrunde liegen. Da sich Vorlesungen zur Quantenmechanik in der Regel am Curriculum der Fachstudierenden orientieren, scheinen weniger Deutungs- und Interpretationsfragen, sondern stattdessen vielmehr mathematische Ansätze behandelt zu werden. Somit liegt die Vermutung nahe, dass Hochschullehrende ebenfalls die mathematischen Fertigkeiten und weniger ein qualitatives Verständnis als zentral ansehen. Es lässt sich abschließend festhalten, dass das Thema Quantenmechanik auch für Hochschullehrende eine Herausforderung darstellt, den verschiedenen Interessen gerecht zu werden.

Ziel der vorliegenden Studie ist daher, die Vorstellungen von Hochschullehrenden zum Thema Quantenmechanik im Lehramtsstudium am Standort Paderborn exemplarisch zu erfassen und mit den in der Prüfungsordnung festgeschriebenen Inhalten zu vergleichen.

3 Design und Methode

3.1 Methode

Als Forschungsansatz wird die qualitative Analyse von Fallstudien gewählt, welche eine ausführliche Untersuchung von Einzelfällen und den Vergleich verschiedener Fälle ermöglicht. Dieses Vorgehen bietet das Potential, tiefgehende explorative Erkenntnisse generieren zu können (Bortz und Döring 2016). Es wird eine Typisierung der Fälle angestrebt, sodass trotz eines geringen Stichprobenumfangs interindividuelle Muster bezüglich der Vorstellungen von Hochschullehrenden abgeleitet werden können. Hierzu eignet sich die Kontrastierung von Extremfällen. Um die Erklärungskraft der Ergebnisse zu erhöhen, werden mittels Theoretical Sampling möglichst unterschiedliche Fälle ausgewählt (Kuckartz 2018).

Zur Erfassung der Vorstellungen von Hochschullehrenden zur Quantenmechanik und ihrer Meinung nach relevanten Inhaltsbereichen für den Physikunterricht an der Schule werden halbstrukturierte Einzelinterviews geführt. Durch die Orientierung an einem Interviewleitfaden sind die gewonnenen Erkenntnisse zum einen für die verschiedenen Probanden vergleichbar. Es können zum anderen aber darüber hinaus individuelle Nachfragen gestellt werden, sodass tiefgehende Denkprozesse aufgedeckt werden können (Friebertshäuser und Langer 2010; Helfferich 2011).

Der Interviewleitfaden wird auf Basis der bisherigen Forschungslage entwickelt und auf den Untersuchungsgegenstand angepasst (Bortz und Döring 2016). Da bisherige Untersuchungen sich auf Schüler*innen und Studierende beziehen (Müller und Wiesner 1997; Krijtenburg-Lewerissa et al. 2017; Müller und Schecker 2018), können einige Fragestellungen nicht für Hochschullehrende übernommen, sondern müssen der Zielgruppe entsprechend abgeändert werden.

Der Interviewleitfaden gliedert sich in die Teile (1) wissenschaftstheoretische und philosophische Fragen zur Quantenmechanik, (2) didaktische Fragen zur universitären und schulischen Lehre zum Thema Quantenmechanik, (3) konzeptuelle Verständnisfragen fiktiver Studierender in Anlehnung an typische Fehlkonzepte und (4) einer Einschätzung zum Status quo der Fachausbildung zum Thema Quantenmechanik von Lehramtsstudierenden an der Universität Paderborn. Fragen zur Deutung oder zu möglichen Verständnisschwierigkeiten werden absichtlich konfrontativ gestellt, um Stellungnahmen der Hochschullehrenden herbeizuführen.

Die Interviews dauern im Schnitt 34 Minuten, wobei die Länge zwischen 24 Minuten und 46 Minuten schwankt. Sie werden alle von der gleichen Interviewerin geführt. Im Rahmen einer kommunikativen Validierung werden die aus den Interviews rekonstruierten Vorstellungen zwei Probanden vorgelegt und die gezogenen Schlussfolgerungen in Hinblick auf ihre Gültigkeit diskutiert.

Neben der Befragung der Lehrenden werden auch die Prüfungsordnungen für das Lehramt für Gymnasien und Gesamtschulen und für den Bachelor of Science betrachtet. Ihre strukturellen Vorgaben werden mit den Angaben der Lehrenden verglichen. Ferner werden die Prüfungsordnungen beider Studiengänge miteinander verglichen, um Unterschiede bzw. Gemeinsamkeiten zu identifizieren.

3.2 Stichprobe

Das Lehramtsstudium an der Universität Paderborn setzt sich zum Thema Quantenmechanik aus den Modulen Theoretische Physik C (Quantenmechanik), Experimentelle Physik C (Atom- und Quantenphysik) und Struktur der Materie (Atom-, Kern-, Molekül-, Festkörper- und Halbleiterphysik) zusammen. Letzteres wird separat für Lehramtsstudierende angeboten, wohingegen die beiden anderen für Lehramts- und Fachstudierende gemeinsam durchgeführt werden. Bei dem Modul Theoretische Physik C gibt es jedoch eine für Lehramtsstudierende zusätzliche begleitende Veranstaltung in Form eines Tutoriums.

Alle drei Module setzen sich aus einer Vorlesung und einer begleitenden Übungsgruppe, welche zur Vertiefung und Anwendung der Vorlesungsinhalte gedacht ist, zusammen. Typischerweise werden in den Übungsgruppen Aufgaben besprochen, die von den Studierenden vorab bearbeitet werden.

Es werden Hochschullehrende der drei Vorlesungen und der jeweiligen Begleitveranstaltungen befragt (Tab. 1). Da die potentielle Stichprobe von Lehrenden zur Quantenmechanik an der Universität Paderborn begrenzt ist, werden auch Lehrende vergangener Veranstaltungen hinzugezogen. Insgesamt werden acht Hochschullehrende befragt, welche alle männlich sind. Alle angefragten Hochschullehrenden erklärten sich zur Teilnahme bereit.

Die Lehrenden der theoretischen Vorlesung können auch wissenschaftlich der theoretischen Physik zugeordnet werden, wohingegen die Lehrenden von Experimentelle Physik C und Struktur der Materie der experimentellen Physik zugeordnet werden können.

Tabelle 1: Zusammensetzung der Stichprobe

Person	Veranstaltung	Format	Zielgruppe	Status	Lehrerfahrung in Jahren
D1	SdM	V	LA	A. Oberrat	> 10
D2	SdM, Exp. C	V	LA, LA + Fach	Professor	> 10
D3	Theo. C	V	LA + Fach	Professor	> 10
D4	Theo. C	V	LA + Fach	A. Oberrat	> 10
T1	Theo. C	Ü	LA + Fach	PostDoc	< 5
T2	Theo. C	Ü	LA + Fach	Doktorand	< 1
T3	Theo. C	Ü, T	LA + Fach, LA	Doktorand	< 2
T4	Theo. C	T	LA	Student	< 2

Anmerkungen: SdM – Struktur der Materie, Exp. C – Experimentalphysik C, Theo. C – Theoretische Physik C, V – Vorlesung, Ü – Übung, T – Tutorium, LA – Lehramtsstudierende, Fach – Fachstudierende, A. Oberrat – Akademischer Oberrat

4 Auswertung

Der Schwerpunkt der vorliegenden Untersuchung liegt auf der Analyse der Interviews. Die Analyse der Prüfungsordnungen dient der Untersuchung der Kontextfaktoren und wird lediglich zur Orientierung herangezogen. Im Folgenden werden die Vorgehensweisen bei der Analyse der verschiedenen Daten vorgestellt.

Die Interviews werden als Audiodatei aufgenommen und transkribiert. Als Auswerteverfahren wird die strukturierende qualitative Inhaltsanalyse nach Kuckartz (2018) verwendet. Dieses Verfahren eignet sich insofern zur Untersuchung der

Forschungsfrage, weil ein qualitatives Textverständnis und auch die Beschreibung latenter Inhalte, in diesem Fall der Vorstellungen der Hochschullehrenden, angestrebt wird. Die qualitative Inhaltsanalyse stellt dabei ein regelgeleitetes und systematisches Verfahren zur Textinterpretation dar. Zu diesem Zweck wird ein Kategoriensystem entwickelt, welches zur Auswertung der Textdateien verwendet wird. So können relevante Textstellen identifiziert, zusammengefasst und strukturiert werden.

Zunächst werden dazu deduktiv die Hauptkategorien in Anlehnung an den Interviewleitfaden gebildet. Hierbei werden empirische Erkenntnisse zu Fehlvorstellungen von Schüler*innen und Studierenden, Aspekte zur festgestellten Diskrepanz zwischen schulischer und universitärer Lehre und strukturelle Rahmenbedingungen wie die gemeinsame Ausbildung von Lehramts- und Fachstudierenden berücksichtigt (vgl. Kapitel 2). Anschließend werden zu den Hauptkategorien Subkategorien induktiv aus dem Textmaterial konstruiert.

Daraus folgt das in Tabelle 2 dargestellte Kategoriensystem, welches sich in die Hauptkategorien 1) Ziele der eigenen Lehre, 2) Ziele für die Schule, 3) Lernschwierigkeiten der Quantenmechanik, 4) Deutung der Quantenmechanik, 5) Rahmenbedingungen auf Personenebene und 6) Rahmenbedingungen auf Strukturebene gliedert.

Neben den Befragungen wird eine Analyse der Prüfungsordnung für das Lehramt für Gymnasien und Gesamtschulen und für den Bachelor of Science vorgenommen, um die Kompetenzen und Inhaltsbereiche, die für die Lehre vorgegeben sind, mit den Äußerungen der Hochschullehrenden vergleichen zu können (PO B. Ed. 2017, PO B. Sc. 2017). Die Vorgaben aus den Prüfungsordnungen der beiden Studiengänge werden in einem ersten Schritt verglichen. Bei Unterschieden wird untersucht, ob diese struktureller oder inhaltlicher Art sind. In einem zweiten Schritt wird die Prüfungsordnung für den Lehramtsstudiengang hinsichtlich der Inhalte und der angestrebten Kompetenzen analysiert und festgehalten, inwieweit Wert auf ein qualitatives Verständnis gelegt wird und welchen Stellenwert der Mathematisierungsgrad der Inhalte hat.

Tabelle 2: Kategoriensystem zur Auswertung der in den Interviews geäußerten Vorstellungen der Hochschullehrenden

1. Ziele der eigenen Lehre	2. Ziele für die Schule
a) Aufgaben/Formalismus üben	a) Geeignete Elementarisierung
b) Standardprobleme bearbeiten	b) Zentrale Inhaltsbereiche
c) Analogien herstellen	
d) Konzeptverständnis aufbauen	
3. Lernschwierigkeiten der Quantenmechanik	4. Deutung der Quantenmechanik
a) Mathematische Schwierigkeiten	a) Kalkülorientierter Zugang ¹
b) Gegensatz zur klassischen Physik	b) Offen für Deutungsfragen
	c) Vertraut mit Deutungsansätzen
5. Rahmenbedingungen auf individueller Ebene	6. Rahmenbedingungen auf struktureller Ebene

¹ Unter einem kalkülorientierten Zugang wird die Orientierung an quantitativen Erläuterungen mittels Formeln bzw. Rechenverfahren verstanden.

a) Fachkombination der Lehramtsstudierenden	a) Keine Trennung der Vorlesungen
b) Lehramtsstudierende sind fleißig und können gut erklären	b) Gemeinsame Vorlesung mit zusätzlichen Angeboten für Lehramtsstudierende
c) Physikstudierende haben ein anderes Vorwissen	c) Für Lehramtsstudierende separate Vorlesungen mit mehr Breite und weniger Tiefe
d) Wahrnehmung des Leistungsspektrums	d) Für Lehramtsstudierende separate Vorlesungen mit mehr mathematischer Unterstützung

Anmerkungen: Die Subkategorien 2a) und 2b) sind noch weiter ausdifferenziert worden und werden im Kapitel 5.2 näher vorgestellt.

5 Ergebnisse

Es werden zuerst die Ergebnisse aus den Interviews zu den Gesichtspunkten universitäre Lehre, schulischer Unterricht, Deutungsfragen der Quantenmechanik und Rahmenbedingungen der universitären Lehre vorgestellt und in Beziehung gesetzt. Anschließend werden die einzelnen Fälle verglichen und zu Typen zusammengefasst. Es lassen sich zwei verschiedene Typen von Hochschullehrenden ableiten.

5.1 Ziele der eigenen Lehre und mögliche Lernschwierigkeiten

Wie anhand der bisherigen Forschungserkenntnisse zu erwarten war, steht für die befragten Hochschullehrenden das Einüben mathematischer Fertigkeiten im Mittelpunkt ihrer Lehre (vgl. Abb. 1). Aber die Bearbeitung von Standardproblemen und der Aufbau von Konzeptverständnis hat insbesondere für die befragten Dozenten der Vorlesungen ebenfalls einen hohen Stellenwert. Tatsächlich gibt es sogar einen Dozenten, der dies als das wesentliche Ziel für die Lehramtsausbildung ansieht und weniger Wert auf die mathematische Beschreibung legt:

„Man will ja, es ist nicht viel, dass sie alles perfekt rechnen können. Das ist total Quatsch. Die studieren Lehramt. Die wollen, die brauchen die Konzepte hinter den Dingen. Natürlich sollen die Grundsachen rechnen können. Aber die müssen nicht Quantenmechanik in der Schule großartig betreiben.“ (D2, 35)

Das Ziel *Analogien herstellen* scheint hingegen insgesamt nur eine untergeordnete Rolle zu spielen.

Offensichtlich besteht ein Zusammenhang zwischen dem Veranstaltungsformat und den geäußerten Zielen, denn es zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den Zielsetzungen der befragten Tutoren und Dozenten. Die Tutoren fokussieren primär das Einüben mathematischer Fertigkeiten, wohingegen die Dozenten vielfältigere Ziele nennen. Dieser Befund passt zur Anlage der Tutorien bzw. Übungsgruppen, welche der Anwendung von Inhalten aus der Vorlesung in Form von Aufgaben dienen. Es wird daraus jedoch auch die Auslegung dieser Intention deutlich, da als Anwendung vor allem die mathematische Anwendung und nicht die Anwendung auf konzeptueller Ebene verstanden wird.

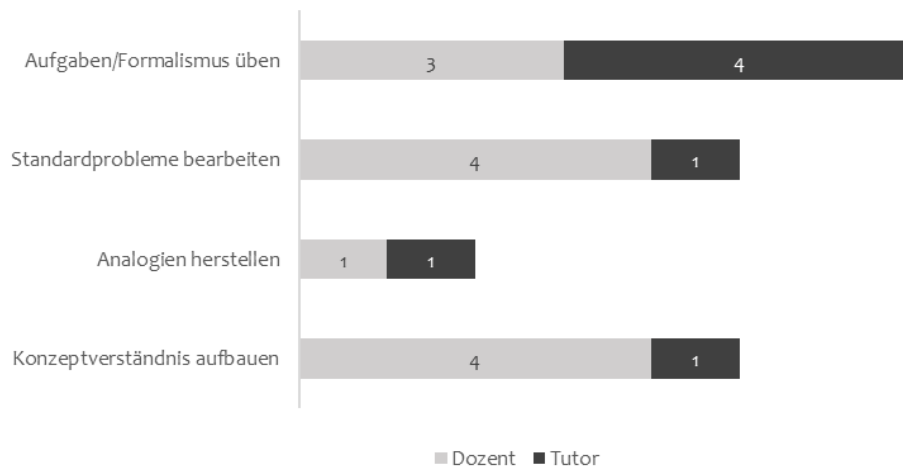


Abbildung 1: Genannte Ziele universitärer Lehre zur Quantenmechanik

Als mögliche Lernschwierigkeiten der Quantenmechanik für Studierende werden von allen befragten Hochschullehrenden mathematische Schwierigkeiten genannt. Nur eine Person gibt darüber hinaus auch konzeptuelle Verständnisschwierigkeiten als mögliche Lernschwierigkeit an. Dies verwundert, da die Bildung von konzeptuellem Verständnis als ein wesentliches Ziel von den Befragten angestrebt wird und zudem angenommen werden kann, dass viele Studierende konzeptuelle Verständnisschwierigkeiten in der Quantenmechanik haben (vgl. Kapitel 2).

Obschon ein Teil der befragten Hochschullehrenden Lehramtsstudierende separat und der andere Teil Lehramtsstudierende gemeinsam mit den Fachstudierenden unterrichtet, äußern diese beiden Gruppen keine unterschiedlichen Zielsetzungen oder Lernschwierigkeiten.

5.2 Ziele für die Schule

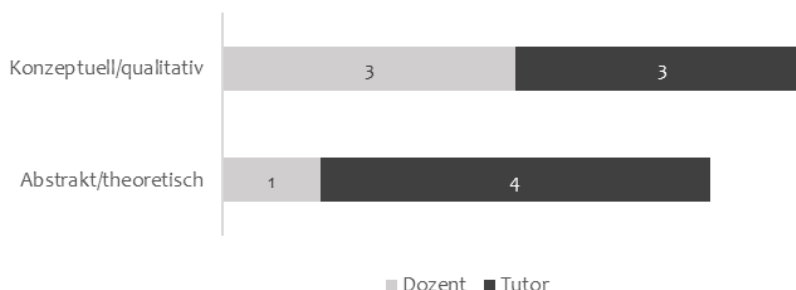
Um erfassen zu können, welche Zielsetzungen die befragten Hochschullehrenden für das Lehramtsstudium wichtig finden, werden sie u.a. nach ihrer Einschätzung zu relevanten Inhaltsbereichen der Quantenmechanik in der Schule gefragt. Als Ziele für die Schule werden in den Interviews die folgenden Inhaltsbereiche genannt:

- Wissenschaftstheorie und Deutungsfragen (5)
- Atommodelle/Struktur der Materie (4)
- Energiequantisierung (z.B. Potentialtopf oder Photoeffekt) (3)
- Welle-Teilchen-Dualismus (2)
- Doppelspaltversuch (2)
- Stern-Gerlach-Versuch (1)

Da recht unterschiedliche Inhaltsbereiche und nur Wissenschaftstheorie und Deutungsfragen von mehr als der Hälfte der Teilnehmer angegeben wird, scheint kein Konsens unter den befragten Hochschullehrenden zu herrschen. Ferner unterscheiden sich die genannten Inhaltsbereiche sowohl in ihrer Art als auch in ihrer Allgemeinheit (Konzept, Modell oder Versuch). Aus diesem Grund kommen vermutlich auch die allgemeiner

formulierten Bereiche häufiger vor. Welche Inhaltsbereiche und wie viele pro Person genannt werden, ist zudem individuell unterschiedlich. Es fällt lediglich auf, dass die Tutoren eher konkrete Inhaltsbereiche wie Versuche aufzählen.

Abbildung 2: Geeignete Elementarisierung für die Schule



Neben den inhaltlichen Zielen wird auch nach einer geeigneten Elementarisierung in der Schule gefragt (vgl. Abb. 2). Diese wird in (i) abstrakt/theoretisch und (ii) konzeptuell/qualitativ unterteilt. Die befragten Hochschullehrenden plädieren überwiegend für einen konzeptuellen und qualitativ-orientierten Schulunterricht (6 Personen, 19 Codes). Demgegenüber sprechen sich fünf Personen für einen abstrakten und eher theoretisch geprägten Schulunterricht aus, allerdings mit nur fünf Codes. Auffällig ist, dass sich unter diesen fünf Personen alle vier befragten Tutoren befinden. Da bereits für die Ziele universitärer Lehre eine ähnliche Tendenz festgestellt wurde, lässt sich daraus möglicherweise folgern, dass die befragten Tutoren im Gegensatz zu den Dozenten vermehrt mathematisch-abstrakte Inhalte und weniger ein konzeptuelles Verständnis als zentral für die Quantenmechanik ansehen.

Insgesamt kann zusammengefasst werden, dass die befragten Hochschullehrer überwiegend eine konzeptuelle und qualitative Behandlung der Quantenmechanik als Ziel für den Schulunterricht benennen, was sich sowohl in den geäußerten Inhaltsbereichen als auch in der angegebenen Art der Elementarisierung widerspiegelt. Diese Sichtweise deckt sich mit fachdidaktischen Empfehlungen für die Schule (vgl. Fischler, 1992; Reinhold, 2006). Vor dem Hintergrund der Diskrepanz zwischen schulischen und universitären Inhaltsbereichen (vgl. Kapitel 2) überrascht diese qualitative Einstellung zu Schulinhalten der befragten Hochschullehrenden.

5.3 Deutung der Quantenmechanik

Da die Diskussion von Interpretationsfragen der Quantenmechanik eine bedeutende Rolle in Bezug auf den Aufbau eines tiefgehenden qualitativen Verständnisses spielt, werden die Hochschullehrenden nach ihrer Einstellung zur Interpretation der Quantenmechanik und zum Stellenwert solcher Fragen in der universitären Lehramtsausbildung befragt.

Bezeichnend ist, dass uneingeschränkt alle Befragten als kalkülorientiert bezüglich des Umgangs mit Deutungen eingestuft werden können.

„Also mit der Deutung letztendlich würde ich sagen, es ist eigentlich ziemlich egal, welche Deutung man da nimmt. Man muss halt dann sorgen, dass der Messprozess so abläuft, wie er abläuft. Also warum das so ist, da kann man viel darüber philosophieren. Aber da ich

mich für Philosophie nicht interessiere, sondern eher für die physikalische Seite, es ist völlig egal, wie ich das interpretiere.“ (D3, 21)

Gleichwohl zeigen sich auch viele vertraut mit den Deutungsansätzen der Quantenmechanik (7). Zwei Personen geben sogar an, die Diskussion von Deutungsfragen sei nicht nur für Lehramtsstudierende, sondern auch für Fachstudierende wichtig. Darüber hinaus sagen zwei Lehrende, dass sie sich „privat“ intensiver mit der Interpretation der Quantenmechanik auseinandersetzen. Offen bleibt, ob diese Betonung der privaten Auseinandersetzung impliziert, dass eine berufliche Auseinandersetzung – sei es in der Forschung oder in der Lehre – nicht erstrebenswert ist oder nicht anerkannt wird. Interessanterweise beziehen sich genau diese beiden Lehrenden für ihre Lehre auf das berühmte Zitat von David Mermin „Shut up and calculate“², was möglicherweise diese Vermutung unterstützt.

Weiterhin fällt auf, dass drei Lehrende bei der Beantwortung der Verständnisfragen fiktiver Studierender teilweise semiklassisch argumentieren, wie bspw. dass je nach Versuch Wellen- bzw. Teilcheneigenschaften vorliegen oder dass zwischen klassischem Licht und Licht auf mikroskopischer Skala unterschieden werden muss. Daraus kann zwar nicht geschlossen werden, dass diese Lehrenden selber semiklassische Vorstellungen besitzen, da dies auch den (pragmatischen) sprachlichen Formulierungen geschuldet sein könnte. Es könnten dadurch jedoch semiklassische Vorstellungen von Studierenden noch verfestigt werden (Schecker und Duit 2018), sodass zumindest auf eine geringe Sensibilisierung seitens der jeweiligen Lehrenden geschlossen werden kann.

5.4 Rahmenbedingungen der universitären Lehrerbildung

Bei den Rahmenbedingungen universitärer Lehre kann zwischen Aspekten auf individueller und struktureller Ebene unterschieden werden. Diese werden im Folgenden nacheinander vorgestellt.

Auf individueller Ebene fällt auf, dass als Lernerschwernis von vielen ein nicht-mathematisches Zweitfach der Lehramtsstudierenden genannt wird (6). Dies zeigt erneut den hohen Stellenwert der Mathematisierung in Veranstaltungen zur Quantenmechanik für die befragten Hochschullehrenden. Dennoch wird betont, dass Lehramtsstudierende keinesfalls per se schlechter in den Veranstaltungen abschneiden. Einige Lehrende sprechen sogar sehr positiv von den Leistungen mancher Lehramtsstudierender und stellen vielmehr eine große Leistungsbandbreite bei den Studierenden insgesamt fest (5).

Bezeichnend ist im Gegensatz dazu, dass bei insgesamt vier Lehrenden die Attribution *Lehramtsstudierende sind fleißig und können gut erklären* zu finden ist. Es kann von einem Artefakt sozialer Erwünschtheit ausgegangen werden, da die Interviewerin Lehramt studiert hat und in der Physikdidaktik tätig ist. Auch wenn diese Äußerungen wohlwollend gemeint sind, implizieren sie, dass Lehramtsstudierende zwar fleißiger als Fachstudierende sind, aber auch nur so vergleichbare Leistungen erzielen können. Diese Attribution wird ausschließlich von den befragten Tutoren geäußert. Es ist eine Parallele zu den Befunden von Hoffmann, Häußler und Lehrke (1998) zu erkennen, die eine ähnliche Attribution in

² Mit dieser Aussage wird die Vermeidung von Interpretationsfragen und stattdessen die Konzentration auf die rechnerische Lösung von Fragestellungen befürwortet.

Bezug auf Unterschiede zwischen Mädchen und Jungen im Physikunterricht festgestellt haben. Diese wirkte sich negativ auf die Selbstwirksamkeitserwartungen der Mädchen aus.

Auf struktureller Ebene kann festgehalten werden, dass alle Lehrenden angeben, dass der Status quo an der Universität mit zwei Vorlesungen gemeinsam mit den Fachstudierenden und einer separaten für Lehramtsstudierende gut realisierbar ist. Nichtsdestotrotz spricht sich die Mehrheit für eine grundsätzliche Trennung der Studierenden aus (7). Als Gründe werden weniger Tiefe und stattdessen mehr Breite (7) und eine vermehrte mathematische Unterstützung der Lehramtsstudierenden (2) angeführt. Hochschullehrende, die eine Veranstaltung nur für Lehramtsstudierende bzw. für Lehramts- und Fachstudierende gemeinsam anbieten, geben keine unterschiedlichen Rahmenbedingungen an.

Den in den Interviews genannten Rahmenbedingungen werden nun die Vorgaben aus den Prüfungsordnungen gegenübergestellt. Beim Vergleich der Prüfungsordnung für das Lehramt an Gymnasium und Gesamtschulen und der Prüfungsordnung für den Bachelor of Science werden jeweils die vergleichbaren Veranstaltungen gegenübergestellt (PO B. Ed. 2017, PO B. Sc. 2017). Da die Module Theoretische Physik C und Experimentelle Physik C identisch sind, gelten diesbezüglich für Lehramts- und Fachstudierende die gleichen Kompetenzerwartungen und Prüfungsleistungen.

Das Pendant der Fachstudierenden für Struktur der Materie, welche ein eigenes Modul für Lehramtsstudierende darstellt, ist Experimentalphysik D (Atom-, Kern- und Molekülphysik). Die Themen zur Quantenmechanik im weiteren Sinne (Atom- und Kernphysik einbezogen) sind ebenfalls deckungsgleich. Es besteht lediglich ein Unterschied im Umfang der Themen – weil für das Lehramtsstudium auch noch Themen der Festkörper- und Halbleiterphysik in der Vorlesung behandelt werden, fallen die Themen zur Atom-, Kern, und Molekülphysik weniger umfangreich aus.

In der Prüfungsordnung für das Lehramt an Gymnasien und Gesamtschulen werden für die Quantenmechanik insgesamt die folgenden Kompetenzen aufgeführt:

- Verfügen über ein fundiertes Faktenwissen
- Verfestigung des mathematischen Könnens und Wissens
- Mathematische Formulierung physikalischer Sachverhalte
- Verständnis und Interpretation physikalischer Gleichungen
- Beherrschung der grundlegenden Konzepte

Im Zentrum stehen folglich mathematische Fertigkeiten und Fakten- und Anwendungswissen. Ein konzeptuelles Verständnis wird aber durchaus auch angegeben. Es werden allerdings nicht explizit Interpretations- oder Deutungsfragen erwähnt. Schlussendlich scheint es Auslegungssache zu sein, in welchem Umfang die angegebenen Kompetenzen verfolgt werden.

5.5 Typisierung

Abschließend werden die individuellen Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen den Fällen mit der Intention, interindividuelle Muster zu identifizieren, erfasst und gruppiert (Kuckartz 2018). Dazu erscheint es zur Charakterisierung einzelner Personen zielführend, die Vorstellungen zur universitären Lehre, zum schulischen Unterricht und zur Deutung der

Quantenmechanik (Hauptkategorien 1-4) als Basis für die Typisierung zu verwenden. Die genannten Kontextfaktoren (Hauptkategorien 5-6) werden hingegen außen vor gelassen, weil diese offenkundig sehr durch externe Faktoren geprägt sind und somit weniger Auskunft über individuelle Denkmuster geben.

Da einige Kategorien wie 1a) *Aufgaben/Formalismus üben* oder 3a) *mathematische Schwierigkeiten* fast allen Befragten zugeordnet werden können, eignen sich diese nicht zur Differenzierung der Fälle. Stattdessen werden diejenigen Kategorien als Merkmalsraum für die Typisierung definiert, die individuelle Unterschiede zwischen den befragten Hochschullehrenden aufzeigen (siehe Tab. 3). Zur Typenbildung wird nun das Verfahren *Bildung merkmalsheterogener Typen* nach Kuckartz (2018) angewandt. Dabei werden Typen induktiv aus den empirischen Daten gewonnen, indem die Befragten so gruppiert werden, „dass die einzelnen Typen intern möglichst homogen und extern möglichst heterogen sind“ (Kuckartz 2018, 151). Mithilfe von Fallbeschreibungen und der Kontrastierung von Extremfällen können so die folgenden zwei Typen abstrahiert werden: der kalkülorientierte Typus und der verständnis- und kalkülorientierte Typus.

Der kalkülorientierte Typus zeichnet sich durch die Nennung abstrakter und theoretischer Ziele für die Schule (2a i) und wenige Einträge in den Kategorien konzeptueller und qualitativer Ansatz für die Schule (2a ii), Wissenschaftstheorie und Deutung als zentrale Inhaltsbereiche für die Schule (2b iii), Konzeptverständnis als Ziel der eigenen Lehre (1d) und offen für Deutungsfragen (4b) aus. Die Bezeichnung folgt aus der Nennung primär kalkülorientierter Ziele sowohl für die eigene Lehre als auch für die Schule und einem kalkülorientierten Umgang mit Deutungsfragen der Quantenmechanik. Diesem Typus können insgesamt drei Personen zugeordnet werden, bei denen es sich ausschließlich um Tutoren handelt.

Der verständnis- und kalkülorientierte Typus zeichnet sich hingegen mit keiner oder kaum Nennungen zur Kategorie abstrakte und theoretische Ziele für die Schule (2a i) und stattdessen vielen Nennungen in den Kategorien konzeptueller und qualitativer Ansatz für die Schule (2a ii), Wissenschaftstheorie und Deutung als zentrale Inhaltsbereiche für die Schule (2b iii), Konzeptverständnis als Ziel der eigenen Lehre (1d) und offen für Deutungsfragen (4b) aus. Die Bezeichnung folgt aus der einerseits verständnisorientierten Haltung, die sich sowohl in den Zielen für die Schule als auch teilweise in den Zielen für die eigene Lehre sowie durch die Offenheit für Deutungsfragen widerspiegelt, und andererseits aus der kalkülorientierten Haltung, die sich wiederum in den Zielen zur eigenen Lehre und zum Umgang mit Deutungsfragen zeigt.

Diesem Typus können fünf Personen, darunter ein Tutor und alle vier Dozenten zugeordnet werden. T4 ist als Grenzfall anzusehen, der aufgrund der vielen Codes im verständnisorientierten Bereich trotz der Nennung abstrakter und theoretischer Ziele für die Schule (2a i) dem zweiten Typus zugeordnet wird. Zudem können alle teilnehmenden Experimentalphysiker diesem Typus zugeordnet werden. Tatsächlich kann der Experimentalphysiker D1 sogar als Extremfall mit auffallend vielen Nennungen im konzeptorientierten Bereich bezeichnet werden. Der Theoretische Physiker D3 weist im Gegensatz dazu deutlich weniger Nennungen in diesem Bereich auf. Womöglich können Experimentalphysiker*innen grundsätzlich vermehrt als konzeptorientiert beschrieben

werden, wohingegen theoretische Physiker*innen stärker auch die mathematischen Fertigkeiten betonen.

Tabelle 3: Merkmalsraum der Typenbildung

Kategorie	Kalkülorientiert			Verständnis- und kalkülorientiert				
	T2	T3	T1	T4	D3	D2	D4	D1
2a) i Abstrakt/theoretisch	1	1	1	1				
2a) ii Konzeptuell/qualitativ	1			2		4	2	6
2b) iii Wissenschaftstheorie und Deutung			1	9	2		3	2
1d) Konzeptverständnis			2		3	3	2	5
4b) Offen für Deutungsfragen		3		4		2	3	3

Auffällig sind die Unterschiede zwischen Tutoren und Dozenten. Es ist zu vermuten, dass die Dozenten insgesamt mehr Ziele für ihre eigene Lehre benennen, da sie eigenständiger in der Gestaltung der Lehrveranstaltung sind. Möglicherweise spielt auch die bisherige Lehr- und Forschungserfahrung eine Rolle, die das eigene Konzeptverständnis erweitert und zu einer intensiven Auseinandersetzung mit der eigenen Lehre geführt haben könnten. Die Sichtweise auf die Schule könnte sich auch aufgrund eigener Kinder im Physikunterricht ändern – Hinweise dafür sind im Interview mit dem Hochschullehrer D3 zu finden.

Zusammenfassend können alle Befragten als kalkülorientiert beschrieben werden. Nichtsdestotrotz sind Unterschiede bezüglich ihrer Haltung zu Deutungsfragen und zum quantenmechanischen Unterricht in der Schule zu erkennen.

6 Zusammenfassung

Aus vorangehenden Forschungsprojekten kann gefolgert werden, dass angehende Lehrkräfte teilweise konzeptuelle Verständnisschwierigkeiten zum Thema Quantenmechanik haben. Allerdings ist fraglich, inwieweit Lehramtsstudierende dieses qualitative Wissen überhaupt an der Universität erwerben, obschon es für den schulischen Unterricht virulent ist. Es wird schon länger von der DPG eine Trennung der Fachausbildung von Lehramts- und Fachstudierenden wegen der unterschiedlichen Zielsetzungen gefordert. Anknüpfend an diese Debatte wurden Hochschullehrenden am Standort Paderborn exemplarisch befragt, um ihre Vorstellungen bezüglich dieser Problematik zu erfassen.

Die befragten Lehrenden geben alle an, dass der Status quo an der Universität Paderborn mit insgesamt drei Vorlesungen zur Quantenmechanik, von denen eine separat für Lehramtsstudierende und die anderen beiden gemeinsam mit den Fachstudierenden angeboten werden, gut realisierbar sei. Gleichwohl befürworten sieben der acht Befragten im Idealfall eine Trennung der Studierenden, um die Lehramtsstudierenden gesondert zu unterstützen.

Eine Analyse der Prüfungsordnungen ergab, dass die angestrebten Kompetenzen für Lehramts- und Fachstudierende zum Thema Quantenmechanik identisch sind. Lediglich bezogen auf das Modul Struktur der Materie wird nicht der gleiche inhaltliche Umfang wie für die Fachstudierenden angestrebt, da hier zwei für Fachstudierende getrennt angebotene Veranstaltungen für Lehramtsstudierende zusammengelegt werden.

Zu den angegebenen Zielen der universitären Lehrerbildung kann zusammenfassend festgehalten werden, dass die mathematische Beschreibung der Quantenmechanik für die befragten Hochschullehrenden einen sehr hohen Stellenwert einnimmt. Die Lehrenden geben das Erlangen und Einüben mathematischer Fertigkeiten als das zentrale Ziel universitärer Veranstaltungen zur Quantenmechanik an (vgl. Schöne 2018). Außerdem argumentieren sie selber in Bezug auf fachliche Fragen häufig auf einer mathematisch-abstrakten Ebene. Darüber hinaus nennen sie fehlendes mathematisches Vorwissen bei den Studierenden als einschränkende Randbedingung, insbesondere bei Lehramtsstudierenden ohne Mathematik als zweites Fach. Gleichwohl nennt die Mehrheit der befragten Hochschullehrenden auch Konzeptverständnis als wichtiges Ziel universitärer Lehre (vgl. Schöne 2018). Die angegebenen Schwerpunkte universitärer Lehre sind mit den Vorgaben der Prüfungsordnung konform, wobei diese auch einen weiten Interpretationsspielraum zulassen.

Zudem plädieren viele für einen erkenntnistheoretischen Zugang zur Quantenmechanik an der Schule, um ein qualitatives Verständnis aufzubauen. Diese Ansicht vertreten alle befragten Dozenten, die befragten Tutoren plädieren hingegen vermehrt für eine mathematisch-abstrakte Vermittlung der Quantenmechanik sowohl an der Schule als auch an der Universität.

Anhand dieser Merkmale können die befragten Hochschullehrenden zwei Typen zugeordnet werden: dem kalkülorientierten Typus und dem verständnis- und kalkülorientierten Typus. Der erstere lässt sich dadurch charakterisieren, dass dieser Typus vor allem mathematische Aspekte der Quantenmechanik fokussiert. Der verständnis- und kalkülorientierte Typus legt hingegen neben mathematischen Herangehensweisen auch großen Wert auf konzeptuelles Verständnis in der universitären Lehre. Für den Schulunterricht hält dieser Typus die wissenschaftstheoretischen Aspekte der Quantenmechanik für zentral. Schöne (2018) leitete aus einer schriftlichen Befragung von Dozent*innen der theoretischen Physik ebenfalls zwei Typen ab, die große Ähnlichkeiten mit den in der vorliegenden Studie identifizierten Typen aufweisen.

Es überrascht nach den Erkenntnissen, dass sich sieben der acht befragten Hochschullehrenden grundsätzlich für eine Separation der Studierenden aussprechen und dass ein Großteil die wissenschaftstheoretische Betrachtung der Quantenmechanik einer mathematisch-abstrakten Behandlung vorzieht, dass dennoch die für die Schule verfolgten Ziele nicht oder kaum in die eigene Lehre transferiert werden. Es werden keine gesonderten Ziele für Lehramtsstudierende neben denen für Fachstudierende geäußert. Es bleibt offen, wo die Lehramtsstudierenden dieses Wissen erlernen sollen.

„In der letzten Vorlesung hatten Studis halt Fragen zur Deutung. Da haben wir was zur Interpretation noch hinten dran gemacht. Das war aber jetzt ein Bonus. [...] Das ist wirklich, sozusagen, wir lernen Grammatik und Vokabeln. Und den Roman zu schreiben, das ist eine andere Aufgabe vielleicht.“ (D4, 35-37)

In Bezug auf die vorgestellten Stufen universitärer Lehre (Riegler 2014) kann daraus gefolgert werden, dass die letzte Stufe eines Conceptual Change von den befragten Lehrenden nicht umgesetzt wird, denn die Schwierigkeiten im konzeptuellen Verständnis scheinen den Lehrenden nicht bewusst zu sein.

Interessant ist, dass durchaus verschiedene Abstufungen zu erkennen sind. Beispielsweise gibt ein Hochschullehrender an,

„Physik ist nicht nur Mathematik und harte Faktensammlung, sondern Physik ist auch ein Gespür für Dinge zu haben, was hinter den Dingen zu erkennen, um dann irgendwo natürlich wieder Konzepte zu bekommen und die dann auch mathematisch zu beschreiben meinerseits. Aber ohne das andere ist man nie ein guter Physiker.“ (D1, 46)

Ein weiterer Hochschullehrender erkennt die Diskrepanz zwischen universitären und schulischen Inhaltsbereichen, hinterfragt aber daraufhin nicht die universitäre Lehrerbildung, sondern stattdessen den schulischen Unterricht. Es gelingt kein Perspektivwechsel.

Abschließend kann zusammengefasst werden, dass den befragten Hochschullehrenden die Problemlage durchaus bewusst zu sein scheint, weil sie sich für eine Trennung von Lehramts- und Fachstudierenden aussprechen. Allerdings transferieren sie ihre Schlussfolgerungen zur Schule nicht auf ihre eigene Lehre. Quantenmechanik ist eben ein anspruchsvolles Thema – sowohl für Lernende als auch für Lehrende, sowohl in der Schule als auch in der Universität.

7 Diskussion

Auf Basis der gewonnen Erkenntnisse soll nun abschließend diskutiert werden, welcher Umfang und welche Tiefe des Fachwissens in der universitären Lehrerbildung angestrebt werden sollte. Zweifelsohne ist es relevant, dass Lehrkräfte ein gut fundiertes Grundlagenwissen haben, um fachliche Inhalte für die Schule einordnen und rekonstruieren zu können. Das gilt bspw. für den mathematischen Formalismus der Quantenmechanik, obwohl dieser offensichtlich nie explizit in der Schule vermittelt wird. Allerdings ist es fraglich, wie umfangreich und tiefgehend dieses universitäre Fachwissen sein muss – denn neben diesem Hintergrundwissen erscheint es wesentlich, Lehrkräften ein vertieftes Schulwissen zu vermitteln, um sie auch auf die konkreten Inhaltsbereiche und Zugangsweisen der Schule vorzubereiten. Dies muss sowohl in Fach- als auch in Fachdidaktikveranstaltungen an der Universität geleistet werden. In zukünftigen Forschungsprojekten wäre es daher sinnvoll zu untersuchen, welche Mischung aus universitärem Fachwissen und vertieftem Schulwissen zielführend ist, um angehende Lehrkräfte optimal auf kompetentes Unterrichten an der Schule vorzubereiten.

Der Standort Paderborn versucht auf die unterschiedlichen Zielsetzungen der Lehramtsausbildung und der wissenschaftlichen Ausbildung einzugehen, indem zumindest teilweise separate Fachveranstaltungen für Lehramtsstudierende angeboten werden. Falls es in Zukunft ressourcenbedingt möglich sein sollte, auch die Module Theoretische Physik C und Experimentalphysik C für Lehramts- und Nebenfachstudierende eigenständig anzubieten, erscheint es vor dem Hintergrund der bestehenden Forschungslage zielführend, Deutungsfragen der Quantenmechanik, die die Besonderheit dieses Gebiets ausmachen, inhaltlich aufzunehmen.

Die exemplarisch am Standort Paderborn gewonnenen Erkenntnisse können offenkundig nicht direkt auf andere Hochschulstandorte übertragen werden. Dennoch liefern die gewonnen Erkenntnisse Einblicke in die Vorstellungen und

Argumentationsmuster von Hochschullehrenden zur Lehramtsausbildung im Fach Physik. Die Problemlage der Quantenmechanik ist aus inhaltlicher Perspektive sicherlich ein Spezialfall, aber es ist anzunehmen, dass auch in anderen Fachbereichen der Lehrerbildung die wissenschaftliche Ausbildung und weniger der Erwerb von Fachwissen als Grundlage für die Rekonstruktion von Fachinhalten für den schulischen Unterricht im Vordergrund steht. Insbesondere, wenn Fachveranstaltungen gemeinsam für Lehramts- und Fachstudierende angeboten werden. Daher ist die in der vorliegenden Studie untersuchte Problemlage auch für andere Bereiche der Lehramtsausbildung von Bedeutung.

Literatur

- Bortz, J. & Döring, N. (2016). *Forschungsmethoden und Evaluation*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Deutsche Physikalische Gesellschaft (2006). *Thesen für ein modernes Lehramtsstudium im Fach Physik: Eine Studie der Deutschen Physikalischen Gesellschaft e. V.* Online unter: https://www.dpg-physik.de/static/info/lehramtsstudie_2006.pdf [02.07.2019]
- Enkrott, P., Buschhüter, D., Borowski, A. & Fischer, H. (2019). Modellierung und Entwicklung von Fachwissen angehender Physiklehrkräfte. In C. Maurer (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Bildung als Grundlage für berufliche und gesellschaftliche Teilhabe* (349-352). Kiel: IPN.
- Fischler, H. (1992). *Quantenphysik in der Schule*. Kiel: IPN.
- Friebertshäuser, B. & Langer, A. (2010). Interviewformen und Interviewpraxis. In B. Friebertshäuser, A. Langer & A. Prengel (Hrsg.), *Handbuch Qualitative Forschungsmethoden in der Erziehungswissenschaft* (437-455). Weinheim, München: Juventa.
- Helfferrich, C. (2011). *Die Qualität qualitativer Daten. Manual für die Durchführung qualitativer Interviews*. Heidelberg: VS Verlag.
- Hoffmann, L., Häußler, P. & Lehrke, M. (1998). *Die IPN-Interessenstudie Physik*. Kiel: IPN.
- Hossenfelder, S., Marletto, C. & Vedral, V. (2017). Quantum Effects in the Gravitational Field (31). *Nature*, 549.
- Huber, L., Pilniok, A., Sethe, R., Szczyrba, B. & Vogel, M. (2014). Mehr als ein Vorwort: Typologie des Scholarship of Teaching and Learning. In L. Huber, A. Pilniok, R. Sethe, B. Szczyrba & M. Vogel (Hrsg.), *Forschendes Lehren im eigenen Fach. Scholarship of Teaching and Learning in Beispielen. Blickpunkt Hochschuldidaktik* (7-17). Bielefeld: Bertelsmann Verlag.
- Jung, W. (1983). *Anstöße. Ein Essay über die Didaktik der Physik und ihre Probleme*. Frankfurt a.M.: Dieserweg.
- Kattmann, U., Duit, R., Gropengießer, H. & Komorek, M. (1997). Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion. Ein Rahmen für naturwissenschaftsdidaktische Forschung und Entwicklung. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 3 (3), 3-18.
- Krijtenburg-Lewerissa, K., Pol, H., Brinkmann, A. & van Joolingen, W. (2017). Insights into Teaching Quantum Mechanics in Secondary and Lower Undergraduate Education. *Physical Review Physics Education Research*, 13.

- Kuckartz, U. (2016). *Qualitative Inhaltsanalyse: Methoden, Praxis, Computerunterstützung*. Weinheim, München: Juventa.
- McKagan, S., Perkins, K. & Wiemann, c. (2010). Design and Validation of the Quantum Mechanics Conceptual Survey. *Physics Education Research*, 6.
- Merzyn, G. (2004). *Lehrerbildung – Bilanz und Reformbedarf*. Schneider: Baltmannsweiler.
- Müller, R. & Wiesner, H. (1997). Vorstellungen von Lehramtsstudenten zur Interpretation der Quantenmechanik. Ergebnisse von Befragungen. Online unter: <https://www.tu-braunschweig.de/Medien-DB/ifdn-physik/potsdam-paper.pdf> [02.07.2019]
- Müller, R. (2003). *Quantenphysik in der Schule*. Berlin: Logos.
- Müller, R. & Schecker, H. (2018). Schülervorstellungen zur Quanten- und Atomphysik. In H. Schecker, T. Wilhelm, M. Hopf & R. Duit (Hrsg.), *Schülervorstellungen und Physikunterricht. Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis* (209-224). Berlin: Springer.
- Niedderer, H. (1992). Atomphysik mit anschaulichem Quantenmodell. In H. Fischler (Hrsg.), *Quantenphysik in der Schule* (88-113). Kiel: IPN.
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (2014). Verbindliche Regelungen zur Erstellung von Fortsetzungsanträgen im Bund-Länder-Programm für bessere Studienbedingungen und mehr Qualität in der Lehre. Online unter: http://www.qualitaetspakt-lehre.de/_media/Foerderaufruf_Periode_2.pdf [12.12.2016]
- Pospiech, G. & Schöne, M. (2012). *Quantenphysik in Schule und Hochschule*. Online unter: <http://phydid.physik.fu-berlin.de/index.php/phydid-b/article/view/392/509> [25.04.2019]
- Prüfungsordnung Bachelor of Education Physik für Gymnasium und Gesamtschulen (2017). Online unter: digital.ub.uni-paderborn.de/hs/download/pdf/2598030?originalFilename=true [22.08.2019]
- Prüfungsordnung Bachelor of Science Physik (2017). Online unter: digital.ub.uni-paderborn.de/hs/download/pdf/2471141?originalFilename=true [22.08.2019]
- Ramsden, P. (2003). *Learning to Teach in Higher Education*. New York: RoutledgeFalmer.
- Reinhold, P. (2006). Elementarisierung und didaktische Rekonstruktion. In H. Mikelskis (Hrsg.), *Physik-Didaktik – Praxishandbuch für die Sekundarstufe I und II* (86-119). Berlin: Cornelsen.
- Riese, J. (2010). Empirische Erkenntnisse zur Wirksamkeit der universitären Lehrerbildung. *PhyDid*, 1(9), 25-33.
- Riegler, P. (2014). Schwellenkonzepte, Konzeptwandel und die Krise der Mathematikausbildung. *Zeitschrift für Hochschulentwicklung*, 9 (4), 241-257.
- Robertson, E. & Kohnle, A. (2009). Testing the Development of Student Conceptual Understanding of Quantum Mechanics. *Proceedings of GIREP-EPEC & PHEC 2009 Conference*, 261-273.
- Schecker, H., Duit, R. (2018). Schülervorstellungen und Physiklernen. In H. Schecker, T. Wilhelm, M. Hopf & R. Duit (Hrsg.), *Schülervorstellungen und Physikunterricht. Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis* (1-22). Berlin: Springer.

- Schöne, M. (2018). *Die Verbesserung der Lehramtsausbildung in der Quantentheorie: Konzeption und Evaluation eines fachdidaktischen Seminars*. Online unter: <https://tinyurl.com/tmvnxex7> [23.04.2020]
- Seidel, T. (2014). Angebots-Nutzungs-Modelle in der Unterrichtspsychologie. *Zeitschrift für Pädagogik*, 60, 850-866.
- Tilloy, A. (2019). Quantengravitation – Für immer unvereinbar? *Spektrum der Wissenschaft* 8, 13-19.
- Ubben, M., Heusler, S. (2019). Modelle in der Atomphysik aus Lehrersicht. In C. Maurer (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Bildung als Grundlage für berufliche und gesellschaftliche Teilhabe* (476-479). Kiel: IPN.
- Weber, K. (2018). *Quantenoptik in der Lehrerfortbildung. Ein bedarfsgeprägtes Fortbildungskonzept zum Quantenobjekt „Photon“ mit Realexperimenten*. Berlin: Logos.

Autorin

Judith Breuer. Universität Paderborn, Didaktik der Physik, Deutschland; Email: judith.breuer@upb.de



Zitiervorschlag: Breuer, J. (2020). Quantenmechanik in der Lehramtsausbildung – Vorstellungen und Ziele von Hochschullehrenden. *die hochschullehre*, Jahrgang 6/2020, online unter: www.hochschullehre.org