

Die Verbesserung der Lehramtsausbildung im Bereich Quantenphysik

M. Schöne*, G. Pospiech*

*Fachdidaktik der Physik, Technische Universität Dresden
matthias.schoene@tu-dresden.de, gesche.pospiech@tu-dresden.de

Kurzfassung

Bei der Ausbildung von Lehramtsstudenten stellt sich die Frage, ob die Vermittlung formal-theoretischer Kenntnisse in der Quantenphysik ausreicht, damit zukünftige Lehrer diese modern, interessant und praxisnah ihren Schülern unterrichten können. Es ist zu vermuten, dass fachdidaktische Kompetenzen, wie das Erkennen von Schülervorstellungen, Vermittlung fachspezifischer methodisch-didaktischer Kenntnisse und die Darstellung eines schüleradäquaten Zugangs ebenfalls zur soliden Ausbildung dazugehören.

Dozenten und Studenten in Deutschland wurden zur Situation und Verbesserungsmöglichkeiten in der Quantenphysikausbildung befragt und daraufhin ein zusätzliches fachdidaktisches Seminar zur Quantenphysik konzipiert, in zwei Semestern an der TU Dresden durchgeführt und im Prä-Post-Design mithilfe fachlicher und fachdidaktischer Testitems sowie Concept Maps evaluiert. Dieser Artikel stellt das Studiendesign und die Ergebnisse der Seminarevaluation vor.

1. Motivation

Die Quantenphysik hat eine enorme Bedeutung als eine der tragenden Säulen der Physik. Für die Naturphilosophie bietet sie die Möglichkeit neu über die Begriffe wie Realität und Erkennbarkeit nachzudenken. Der Wirtschaft und Technik liefert sie viele moderne Anwendungsmöglichkeiten wie Laser und Halbleitertechnik. Daher stellt moderne Physik und vor allem die Quantenphysik einen wichtigen Bereich der physikalischen Allgemeinbildung in den Schulen dar. In der Quantenphysik als ein Grundpfeiler der Physik konnte in den letzten Jahrzehnten durch neue experimentelle Möglichkeiten fundamentale Konzepte zur Unbestimmtheit, Verschränkung und Quanteninformation überprüft werden. Diese haben nicht nur eine Bedeutung für die theoretische Modellbildung, sondern Beantworten tiefgehende philosophische Fragen über das Sein der Dinge und welche Möglichkeiten dieses zu erkennen uns gegeben sind. Leider haben die neuen Entwicklungen keinen Eingang in Lehrpläne und Ausbildung von Lehrern gefunden, der Unterricht an Gymnasien in Quantenphysik ist weiter stark von historischen Entwicklungen und Atommodellen geprägt. Jeder Schüler sollte aber im Rahmen seiner Schulausbildung die Tragweite der Quantenphysik kennen lernen. Es muss daher ein Kanon für die Quantenphysik sowohl an Universitäten als auch Schulen und dazu geeignete Vermittlungswege entwickelt werden (Siehe hierzu beispielsweise Pospiech und Schöne, 2011 und 2012).

Die eigentliche Basis für einen gelungenen Unterricht in moderner Physik stellen aber Physiklehrer dar, die zum einen fachlich die quantenphysikalischen Grundlagen kennen und zum anderen Wissen über geeignete Methoden besitzen, um diese Grund-

lagen und ihre Interpretation dem Schüler zu vermitteln.

Dabei fungieren Lehrer als Bindeglied, so konnte beispielsweise Darling-Hammond (2006) zeigen, dass effektive Lehrer einer der wichtigsten Faktoren für das Lernen von Schülern ist.

Die Vermittlungskompetenz umfasst dabei insbesondere die didaktische Rekonstruktion mit der fachlichen Klärung, der Erfassung der Lernerperspektive, insbesondere der Schülervorstellungen und die sich aus diesen Analysen ergebende didaktische Strukturierung (Kattmann et al., 1997).

Der theoretisch-physikalische und mathematische Apparat der Quantenphysik steht Lehramtsstudenten in den Grundlagen zwar zur Verfügung, aber es fehlt Lehramtsstudenten selbst oft ein konzeptionelle Verständnis für die Quantenphysik, welches ein notwendiges Grundgerüst darstellt, um diese lehren zu können. Studien von Robertson und Kohnle (2008) und Wittmann et al. (2005) sowie in Deutschland von (Müller und Wiesner, 1997) zeigen, dass es bei Lehramtsstudenten spezielle, für die Quantenphysik typische Probleme gibt. Oft fehlt Studenten das konzeptionelle Verständnis über den theoretischen Aufbau der Quantenphysik, so dass die dazugehörigen Übungen zu einem Rechnen ohne mentales Konzept verkommen. Interpretationsfragen werden nicht ausreichend in den untersuchten Vorlesungen geklärt.

Bei einem Großteil der Studenten findet kein Konzeptwechsel von der klassischen Mechanik zur Quantenphysik statt, eine klassische Perspektive wird beibehalten. Das Bohrsche Atommodell wird beispielsweise nicht in Frage gestellt, sondern es wird vielmehr als einfache Erklärung oft herangezogen. Quantenobjekte werden fälschlicherweise als permanent lokalisiert angesehen, häufig wird ein

Bahnbegriff genutzt. Wiesner und Müller (1997) kommen zu der Feststellung: „Sehr oft wird explizit auf in der Schule erworbenes Wissen zurückgegriffen. Die Ausbildung der Lehramtsstudenten in der Universität scheint also nicht ausreichend zu sein, um ein angemessenes quantenmechanisches Bild des Atoms zu vermitteln, mit dem begründete didaktische Entscheidungen gefällt werden können.“ Laut Müller und Wiesner (1997) fokussieren sich die Lehrer in ihrer Quantenphysikausbildung auf eigene Erfahrungen, eigene Überzeugungen über gute Physiklehre, Unterricht an Universitäten und Vorgaben durch den Lehrplan.

Diese Problembereiche führen zu der Annahme, dass die heutige Ausbildung in der Quantenphysik deutlich verbessert werden kann und muss. Die Probleme sind dabei weniger im fachlichen Kern zu suchen, sondern hauptsächlich in den fehlenden fachdidaktischen Fähigkeiten der Lehramtsstudenten. Laut einer DPG-Studie aus dem Jahre 2006 (Großmann und Urban) wird aber immer noch zu viel Wert auf das akademische fachliche bei Vernachlässigung fachdidaktischen Wissens der Lehramtsstudenten gelegt.

Das Lehramt sollte nach Ansicht der Autoren ein ganz eigenständige Profession und kein verkürztes Fachstudium sein. Zu beachten ist, dass diese Studie weitestgehend ein Thesenpapier darstellt, deren Inhalt es aber Wert ist geprüft zu werden.

Dieser Artikel möchte Impulse geben, Probleme in der Ausbildung von Physiklehrern aufzuzeigen und konkrete Verbesserungsvorschläge für den universitären Teil der Lehramtsausbildung geben. Dafür wurde die Anforderungen von Studenten und Dozenten durch eine bundesweite Befragung bestimmt und die daraus gewonnenen Erkenntnisse durch Konzeption eines fachdidaktischen Seminars speziell zur Quantenphysik umgesetzt. Dabei wurde untersucht wie sich das Professionswissen von Lehramtsstudenten am Ende der theoretischen Quantenphysikausbildung darstellt und wie es sich durch einen fachdidaktischen Zusatzkurs, der die Anforderungen berücksichtigt, ändert.

2. Anforderungsanalyse Studenten

Zunächst wurde eine qualitative Explorationsbefragung von fünf Studenten der Technischen Universität Dresden im persönlichen Interview durchgeführt, um wesentliche Kategorien durch Transkription der Interviews und qualitativer Inhaltsanalyse nach Mayring (2010) mit Hilfe des Programmes MAXQDA zu bestimmen. Die Kategorien betreffen die Inhalte der theoretischen Ausbildung, vermittelte Kompetenzen, geeignete Lehrinhalte der Quantenphysik für die Schule sowie gewünschte Themen für das Seminar zur Didaktik der Quantenphysik.

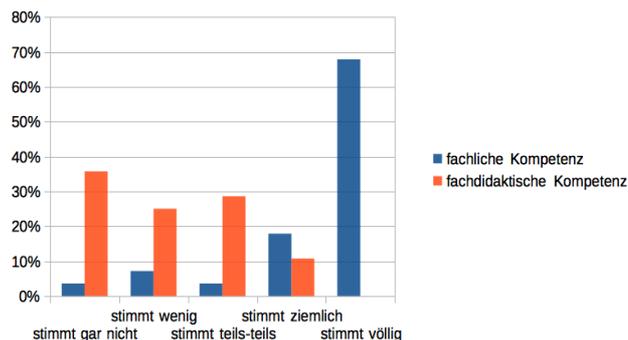


Abb.1: Vermittelte Kompetenzen aus studentischer Sicht

Nachfolgend wurde eine quantitative Studentenbefragung erstellt. Mit Hilfe eines Onlinefragebogens unter Benutzung des Fragetools Limesurvey wurde der Ausgangsfragebogen erweitert und in eine quantitative Form gebracht. 26 Studenten aus Deutschland haben den Fragebogen vollständig ausgefüllt. Es zeigte sich, dass in den Vorlesungen und Übungen im Wesentlichen der Diracformalismus der Quantenmechanik, die Schrödingergleichung, Potentiale und einige historische Versuche behandelt wurden.

In weiteren Fragen kommt zum Ausdruck, dass die Studenten sich fachlich recht gut, in fachdidaktischen Fragestellungen (mit 70 %) aber nicht oder zu wenig auf den Schuldienst vorbereitet fühlen (siehe Abb.1). Dies deckt sich mit der von Hilfert-Rüppel et al. (2012) durchgeführten Studie, bei der Lehrämter mit verschiedenen Fächerkombinationen befragt wurden. Ihnen sei laut Studie eine praxisnahe Ausbildung besonders wichtig.

Die Studenten wünschen sich von einer möglichen Zusatzveranstaltung eine stärkere Erläuterung des physikalischen Modells mit Grundideen und Interpretationsfragen, sowie weitergehende fachdidaktische Fragestellungen wie unterrichtspraktische Methoden und Anwendungsbeispiele (siehe Abb.2).

Dabei zeigt eine Clusteranalyse der studentischen Antworten (Complete-Linkage-Verfahren) mit anschließender Validierung der Gruppen durch Varianzanalyse und multiplen Paarvergleich nur eine sehr kleine Gruppe von Studenten, die ausschließlich Wert auf unterrichtspraktische Methoden legt. Vielmehr gibt es zwei andere wesentliche Gruppen. Die erste mit 45 % der befragten Studenten, die neben wichtigen Anwendungen und Konzepten viel Wert auf die Interpretation quantenmechanischer Probleme legt. Zum anderen eine Gruppe von 32 %, welche stark methodisch orientiert ist, aber im Zusatzseminar auch wichtige Anwendungen kennen lernen möchte.

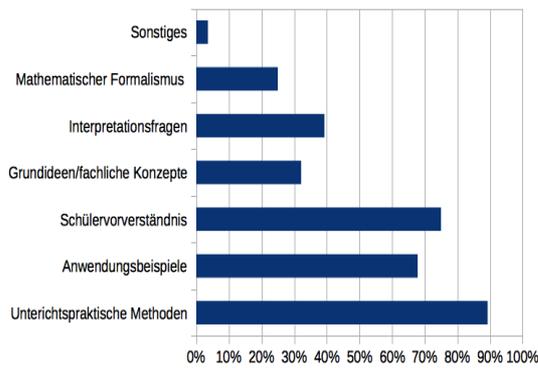


Abb.2: Gewünschte Inhalte des didaktischen Seminars aus Studentensicht

Hinsichtlich relevanter Unterrichtsinhalte nennen die befragten Studenten die Behandlung der Unbestimmtheitsrelation, Anwendungen des Lasers, Photoeffekt, Welle-Teilchen-Dualismus und Interferenz als Unterrichtsthemen; fachlich schwierige Themen wie Drehimpuls, Bose-Einstein-Kondensation, Schrödingergleichung, Psi-Funktion und Strahlungsformeln stehen dagegen zurück (siehe Abb. 3). Interessanterweise werden Quantencomputer und -kryptographie weder als geeignet, noch als ungeeignet angesehen. Dies stützt die Aussage von Müller und Wiesner (1997), dass eigene Schulerfahrungen von den Studenten für das eigene Unterrichten rekonstruiert werden. Allerdings zeigt es auch die Offenheit gegenüber neuen Konzepten, wenn diese nur ansprechend eingeführt werden.

Eine durchgeführte Clusteranalyse (Complete-Linkage-Verfahren) mit anschließender Validierung mittels t-Test zeigt zwei unterschiedliche starke Gruppen: Zum einen sind 70 % Prozent der Studenten bezüglich geeigneter Schulinhalt als *Anwender* einzuordnen, die Quantencomputer, Kryptographie, Laser, Messungen als Schwerpunkte für ihren Unterricht

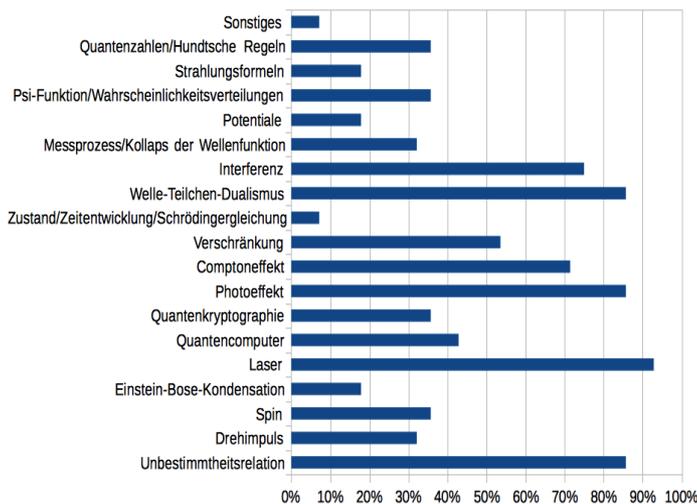


Abb.3: Geeignete schulische Quantenphysikkonzepte aus Studentensicht

bevorzugen. Zum anderen gibt es die Gruppe der *Konzeptionalisten*, die Anwendungen eher ablehnen und den Fokus auf Konzepte wie Spin, Unbestimmtheit und Formalismus, wie Psi-Funktion und Quantenzahlen, legen.

3. Anforderungsanalyse Dozenten

Neben den Studenten wurden 25 Dozenten der Theoretischen Physik aus dem gesamten Bundesgebiet ebenfalls mit Hilfe von Fragebögen (geschlossene und offene Fragen) befragt.

Die von diesen genannten wesentlichen Vorlesungsinhalte stimmen mit denen der Studenten überein. Die für die Vorlesung zur Verfügung stehende Zeit und die mathematischen Fähigkeiten der Studenten werden dabei von den Lehrenden als zu gering angesehen. Die Lehrveranstaltungen sollten laut Aussage der meisten Dozenten im Wesentlichen *Konzepte*, *wichtige Beispiele* und eine *mathematisch-formale Analyse der Quantenphysik* behandeln, *methodisch-didaktische Konzeptionen* werden in selten in den Vorlesungen vermittelt. (Abb. 4)

Untersucht man das Zusammenauftreten (Kontingenz) der qualitativen Kategorien zu den Themen und Zielen der Lehrveranstaltung, so zeigt sich, dass mit 40 Prozent die Kombination von *Konzepte*, *Formalismus* und *Anwendungen* als Themen der Lehrveranstaltung am häufigsten von den Befragten genannt wird. Ähnlich gilt dies auch bei den Zielen.

Es fällt bei der Auswertung der Dozentenfragebögen auf, dass zwar Konzepte und Anwendungen häufig

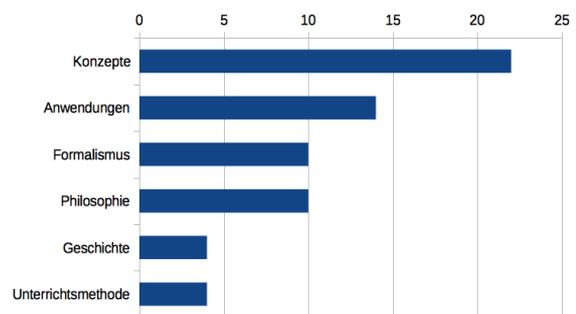


Abb.4: Ziele der Lehrveranstaltung (Auswertung Häufigkeit qualitativer Kategorien)

sowohl als Ziele als auch tatsächlich behandelte Themen genannt werden, hingegen der Vermittlung des Formalismus häufig eine stärkere Geltung, der Philosophie aber eine geringere Bedeutung als ursprünglich als Lehrziel geplant zukommt.

Die Ziele und Themen der Lehrveranstaltungen decken sich mit den aus Dozentsicht zu vermitteln den Kompetenzen (Abb. 5). Auch hier führen die *Erklärung wesentlicher Konzepte*, die *Nennung wichtiger Beispiele/Anwendungen* und die deutlich komplexere Kompetenz *neue Beispiele mit Hilfe wesentlicher Prinzipien/Konzepte* erläutern zu können. *Formale Rechnungen* bzw. das abstraktere Pendant

der *mathematischen Analyse quantenphysikalischer Fragestellungen* werden deutlich seltener genannt. Ein möglicher Grund ist, dass diese als implizit notwendig für die Durchdringung von Konzepten erachtet werden. Für die genauere Untersuchung verschiedener Untergruppen wurde eine Clusteranalyse (Complete-Linkage-Verfahren) berechnet. Dabei zeigte sich eine Lösung mit drei ungefähr gleich großen Gruppen als statistisch günstig. Die Trennung der Gruppen konnte durch Varianzanalyse mit anschließendem multiplen Paarvergleich bestätigt werden. Es kann zwischen einem Typus von Dozenten, der viel Wert auf formale Berechnungen und mathematische Analysen sowie Dozenten, die eher methodisch-didaktische Konzeptionen als vermittelte Kompetenzen anstreben, unterschieden werden. Letztere teilt sich wiederum in zwei Untergruppen, wobei die Dozenten der ersten Gruppe neue Beispiele mittels quantenphysikalischer Prinzipien analysieren zu können als hohe Kompetenz anstreben, die der zweiten hingegen nicht. Auffällig ist, dass trotz der Ausrichtung auf methodische Kompetenzen, Methoden kaum selbst von den Dozenten unterrichtet werden.

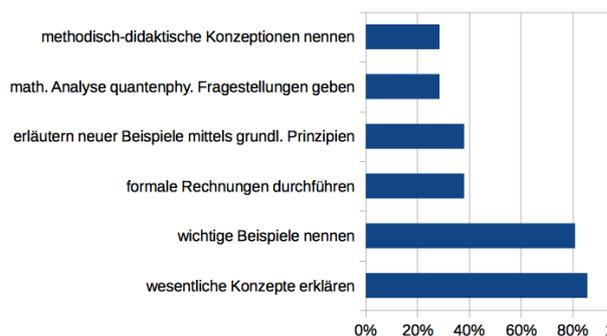


Abb.5: Laut Dozenten vermittelte Kompetenzen

Befragt man die Dozenten nach den wesentlichen Konzepten der Quantenphysik so werden der Formalismus, das statistische Verhalten von Quantenobjekten, die indeterministische Messung und die Komplementarität genannt. Diese am häufigsten genannten Kategorien decken sich mit (Müller und Wiesner, 1997).

Es traten folgende Unterschiede zwischen Lehramtsstudenten und Dozenten auf (siehe auch Pospiech & Schöne 2012):

Studenten

- sehen mehr Details in der Struktur.
- unterscheiden eher zwischen physikalischen Modell und mathematischen Formalismus.
- ordnen Größen wie Spin konkrete Beispiele wie das Wasserstoffatom, aber nicht allgemeine Gesetze wie nicht verschwindende Kommutatoren, zu.
- nennen Indeterminismus des Messprozesses und Unbestimmtheit nicht als Konzepte.

4. Konzeption eines Seminars *Didaktik der Quantenphysik*

Aus den vorangegangenen Studien wurde eine Zusatzveranstaltung mit folgenden Zielen entwickelt:

Fachliches Wissen

Die Studenten:

- kennen die für die Schule wichtigen Konzepte der Quantenphysik.
- kennen die Unterschiede zwischen klassischer Mechanik und Quantenphysik.
- können Beispiele für die Anwendung der Verschränkung geben.
- kennen die wesentlichen Experimente der Quantenphysik und
- die wesentlichen, verschiedenen Interpretationsmöglichkeiten der Quantenphysik

Fachdidaktisches Wissen

Die Studenten:

- wissen wie man wesentliche Konzepte der Quantenphysik vermittelt.
- erkennen die Schwierigkeiten im Lernprozess, das Schülervorverständnis und Schülervorstellungen/-fehlkonzepte.
- kennen passende Methoden und Medien zum Lehren von Quantenphysik.

Darauf aufbauend wurde ein didaktisches Seminar mit starkem Praxisanteil konzipiert. Eine ausführliche Darstellung finden Sie in Schöne (2014, in Druck).

5. Evaluation des Seminars *Didaktik der Quantenphysik*

Für die Evaluation des Seminars wurden Multiple-Choice-Fragen und Fragen mit offenen Antwortmöglichkeiten sowohl zum Fachwissen durch Adaption des Testes von Müller und Wiesner (2000) als auch zum fachdidaktischen Wissen durch Adaption des Testes von Riese (2009) konstruiert. Diese wurden in einer Pilotstudie testtheoretisch validiert, wobei Items mit zu geringer Trennschärfe, Reliabilität oder Schwierigkeit (Deckeneffekt) entfernt wurden. Die Interrater-Reliabilität wurde durch unabhängiges Kategorisieren der offenen Studentenantworten bei einer guten Übereinstimmung von 82 % sichergestellt.

Durch die Kategorisierung wurde eine numerische Bewertung der Antworten festgelegt.

Die Evaluation fand im Prä-/Post-Design mit Experimental- und Kontrollgruppe (Test in einem anderen thematisch nicht verwandten, einsemestrigen Seminar) statt.

Zur Identifikation der Leistungsgruppen wurden die Ergebnisse des Prä-Tests sowohl von Experimental- und der Kontrollgruppe einer Clusteranalyse (Complete-Linkage-Verfahren) unterzogen und anschließend die Gruppeneinteilung durch eine Varianzanalyse und multiplen Paarvergleich validiert. Eine

große Gruppe von 36 % lässt sich dabei schon als durchgehend leistungsfähig, sowohl im fachlichen als auch fachdidaktischen Bereich, einordnen. Die nächstkleinere Gruppe von 24 % sind relativ fachstark hinsichtlich der Quantenphysik, zeigen aber Schwächen im fachdidaktischen Wissen. Schließlich gibt es noch zwei Gruppen mit jeweils 20 %, die einen sehr leistungsschwach in allen Bereichen, die anderen fachlich unterdurchschnittlich, bei fachdidaktischen Fragen deutlich besser, allerdings mit großen Schwächen beim Erkennen und Reagieren auf Schülervorstellungen bezüglich Quantenphysik.

In Abb. 6 sehen Sie die Bewertung des Professionswissens von Experimental- und Kontrollgruppe im Prä-/Post-Vergleich mit der einfachen Standardabweichung als in Klammern.

Die Analyse durch einen t-Test zeigt keine signifikanten Unterschiede im Ausgangsniveau von Experimental- und Kontrollgruppe.

Der Vergleich von Prä- und Postbefragung durch einen t-Test bzw. exakten Wilcoxon-Test zeigt allerdings starke Unterschiede zwischen den beiden Gruppen.

	Prä	Post
Experimentalgruppe		
Fachwissen	8,56 (2,17)	10,8 (1,70)
Fachdidaktisches Wissen	4,59 (1,67)	5,6 (1,07)
Kontrollgruppe		
Fachwissen	8,13 (1,93)	8,33 (1,46)
Fachdidaktisches Wissen	3,6 (0,87)	3,92 (1,54)

Tab.1: Ergebnisse der Evaluation

In der Experimentalgruppe erhöht sich das Fachwissen zwischen den beiden Testzeitpunkten signifikant, hingegen bei der Kontrollgruppe nicht. Der Effekt ist mit Cohens d von $d=1,40$ stark.

Hinzu kommt eine signifikante Erhöhung des fachdidaktischen Wissens in der Experimentalgruppe, der sich in der Kontrollgruppe nicht zeigt. Der Effekt ist mit korrigiertem Cohens d von $d=0,66$ im mittleren Bereich.

Eine ergänzende Evaluation wurde über von den Studenten am Anfang und Ende des Seminars angefertigten Concept Maps durchgeführt.

Dabei wurden die Veränderungen bei den Konzepten und Präpositionen am Anfang und Ende des Semesters in der Experimental- und Kontrollgruppe, insbesondere bei den zentralen und häufigen Konzepten, untersucht. In der Experimentalgruppe gilt:

- Neues Experiment *Mach-Zehnder* ist hinzukommen
- Es erfolgt jeweils eine Generalisierung von *Photonen* und *Elektronen* als *Quantenobjekt*, dieser Begriff ist nun deutlich zentraler (vernetzter).

- Die *Verschrankung* ist ein neuer, wichtiger Begriff
- Der Begriff *Unbestimmtheit* ist nun wichtiger.
- Der Begriff *Photoeffekt* wird weniger wichtig.
- Die *Nichtlokalisierbarkeit* ist etwas zentraler. In der Kontrollgruppe ist er aber nicht zentral und zeigt auch keine Veränderung.

Entscheidend für die Analyse sind folgende beiden Ergebnisse:

- Die Übereinstimmung der Proposition ist in der Kontrollgruppe signifikant größer als in der Experimentalgruppe.
- In der Kontrollgruppe ändern sich zentrale Konzepte in ihrer Zentralität und Häufigkeit nicht.

Dadurch wird deutlich, dass das Seminar in der Lage ist die kognitive Struktur der Studenten, repräsentiert durch Concept Maps, zu ändern und sich diese Änderung in der Kontrollgruppe nicht zeigt.

Eine detaillierte Analyse finden Sie in der Doktorarbeit von Schöne (2014, in Druck).

6. Zusammenfassung

Durch die Kombination verschiedenster Verfahren konnte im Bereich der Fachdidaktik der Quantenphysik zunächst die Anforderungen von Lehramtsstudenten und Dozenten an eine adäquate Ausbildung ermittelt und ein, die Theorievorlesungen ergänzendes, fachdidaktisches Seminar konzipiert und schließlich hinsichtlich fachlichen und fachdidaktischem Wissen positiv evaluiert werden.

Bei den Anforderungen fällt auf, dass Dozenten mehr Wert auf Konzepte, Anwendungen/Beispiele, aber vor allem auch auf den Formalismus legen. Die philosophischen Interpretationsfragen kommen trotz anders lautender Ziele zu kurz.

Studenten sehen sich allein durch die Vorlesungen in theoretischer Physik fachdidaktisch nicht ausreichend vorbereitet. Zwar liegt ihr Interesse auch stark im Bereich Konzepte und Anwendungen/Beispiele. Sie interessieren sich daneben stark für Interpretationsfragen, aber vor allem stärker für fachdidaktische Fragen wie Schülervorverständnis und unterrichtspraktische Methoden.

Darauf aufbauend wurde ein Seminar gestaltet, welches viel Wert auf Konzepte, Interpretationen einschließlich philosophischer Aspekte und methodischen Übungen legt.

Die Umsetzung eines solchen Seminars zeigte Erfolg nicht nur in der signifikanten Verbesserung des fachlichen und fachdidaktischen Wissens, sondern auch in einer wesentlichen Änderung der kognitiven Struktur der Seminarteilnehmer, welche durch Concept Maps repräsentiert wird.

7. Literatur

- [1] Großmann, S. und Urban, K. (2006). Thesen für ein modernes Lehramtsstudium im Fach Physik. Deutsche Physikalische Gesellschaft. http://www.dpg-physik.de/static/info/lehramtsstudie_2006.pdf
- [2] Hilfert-Rüppel, D., Eghtessad, A., Looß, M., und Höner, K. (2012). Empirische Studien zum Professionalisierungsprozess in den naturwissenschaftlichen Fächern der Lehramtsstudiengänge. *Lehrerbildung auf dem Prüfstand*, 5(2)
- [3] Kattmann, U., Duit, R., Gropengießer, H., und Komorek, M. (1997). Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion - Ein Rahmen für naturwissenschaftsdidaktische Forschung und Entwicklung. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 3, 3, 3-18
- [4] Mayring, P. (2010). *Qualitative Inhaltsanalyse Grundlagen und Techniken*. Beltz, Weinheim.
- [5] Müller, R. und Wiesner, H. (1997). Vorstellungen von Lehramtsstudenten zur Interpretation der Quantenmechanik Ergebnisse von Befragungen. Lehrstuhl für Didaktik der Physik, Universität München, München. <https://www.tu-braunschweig.de/Medien-DB/ifdn-physik/potsdam-paper.pdf>
- [6] Müller, R. und Wiesner, H. (2000). Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik : erste empirische Ergebnisse. In *Didaktik der Physik*, Seite 1–4, München. Lehrstuhl für Didaktik der Physik. <https://www.tu-braunschweig.de/Medien-DB/ifdn-physik/erste-ergebnisse-quanten.pdf>
- [7] Pospiech, G. und Schöne, M. (2011). QUANTUM PHYSICS IN TEACHER EDUCATION. *fisica.uniud.it*, FFP12(November):1–8. <http://www.fisica.uniud.it/~ffp12/ftp/fullpapers/G%20Pospiech.pdf>
- [8] Pospiech, G., & Schöne, M. (2012). Quantenphysik in Schule und Hochschule. *PhyDid B-Didaktik Der Physik* <http://phydid.physik.fu-berlin.de/index.php/phydid-b/article/view/392/509>
- [9] Riese, J. (2009). Professionelles Wissen und professionelle Handlungskompetenz von (angehenden) Physiklehrkräften. 97:212.
- [10] Robertson, E. and Kohnle, A. (2008). Testing the Development of Student Conceptual Understanding of Quantum Mechanics.
- [11] Schöne, M. (2014, in Druck) Die Verbesserung der Lehramtsausbildung im Bereich moderner Physik am Beispiel der Quantentheorie. *Fachdidaktik Physik*, Technische Universität Dresden, Dresden
- [12] Wittmann, M. C., Morgan, J. T., and Bao, L. (2005). Addressing student models of energy loss. <http://arxiv.org/pdf/physics/0502053.pdf>