

Lernende erläutern Wesenszüge der Quantenphysik: Doppelspalt und Interferometer im Fokus

Theoretischer Hintergrund. In der Agenda Quantensysteme 2030¹ wurde unter Einbezug von Beteiligten der Fachcommunity aus Forschung und Industrie verfasst, um „Handlungsempfehlungen für zukünftige Aktivitäten zu erarbeiten, [...] einen Rahmen zu setzen und eine fundierte Grundlage für ein mögliches Förderprogramm ‚Quantensysteme‘ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung zu schaffen“ (VDI, 2021). Quantentechnologien benötigen „gut ausgebildete Fachkräfte insbesondere aus Bereichen wie den Ingenieurwissenschaften und der Informatik, die bisher kaum mit Themen der Quantenphysik zu tun hatten“ (VDI, 2021, S. 61). Deswegen ist das Themenfeld *Education, Training, Outreach, Kooperation und Vernetzung* wichtiger Bestandteil der Agenda. Für den Quantenphysikunterricht an Schulen wurde dabei unter anderem die Entwicklung von Experimenten als Ziel festgelegt: „*Da der Schulunterricht auf Experimente gestützt sein soll, ist es für eine erfolgreiche Umsetzung erforderlich, im Unterricht einsetzbare Experimentiermöglichkeiten zu entwickeln. [...] Deshalb ist es schon heute sinnvoll, künftige Experimentiermöglichkeiten zu entwickeln und bezüglich ihrer Lernwirksamkeit zu untersuchen*“ (VDI, 2021, S. 67). Dabei existiert aus physikdidaktischer Sicht ein besonderes Interesse an solchen Experimenten zur Quantenphysik (QP), mit denen erstens ein Konzeptwechsel von mechanistischen zu quantenphysikalisch geprägten Vorstellungen initiiert werden kann (Kalkanis et al., 2003), und die zweitens zur Vermittlung der Wesenszüge der QP (Küblbeck & Müller, 2002) geeignet sind (Weber, 2020). Zwar wurden in der physikdidaktischen Forschung zahlreiche experimentbasierte Konzepte und Curricula zur QP für die Lehre vorgeschlagen (vgl. Scholz et al., 2020) und evaluiert (Bitzenbauer, 2021). Jedoch fehlen bisher empirische Untersuchungen, die im Detail Lernprozesse von Schülerinnen und Schülern in experimentbasierten Lernumgebungen zur QP untersuchen. Beispielsweise ist im Kontext verschiedener Experimente zur QP von Schlüsselexperimenten die Rede (vgl. Waitzmann et al., 2020), aber es liegen keine empirischen Befunde hinsichtlich der spezifischen Vor- und Nachteile dieser Experimente für die Lernprozesse von Schülerinnen und Schülern vor, welche die Identifikation eines konkreten Experiments als *das* Schlüsselexperiment für den Quantenphysikunterricht rechtfertigen würden.

Schlüsselexperimente für den Quantenphysikunterricht. Das Doppelspaltexperiment mit einzelnen Quantenobjekten (DSE) wird mitunter als Schlüsselexperiment für die Lehre der QP bezeichnet, weil im Doppelspaltexperiment „steckt“, was in der Quantenphysik erstrangig ist“ (Leisen et al., 2000, S. 6). Ein physikalisch äquivalentes Experiment stellt das Experiment zur Interferenz einzelner Quantenobjekte im Michelson-Interferometer (MI) dar (Maries et al., 2020). Die Interferenz einzelner Quantenobjekte ermöglicht direkten Zugang zu den Wesenszügen der QP (Küblbeck & Müller, 2002), insbesondere lassen sich damit die Superposition von Zuständen, die Nichtlokalität, und die statistische Deutung der QP thematisieren. Die Quanteninterferenz kann nicht klassisch erklärt werden und das DSE- oder ein Interferometer-Experiment mit einzelnen Quantenobjekten erzeugt deswegen bei Lernenden einen kognitiven Konflikt (vgl. Waitzmann et al., 2020), vor allem dann, wenn

¹https://www.quantentechnologien.de/fileadmin/public/Redaktion/Dokumente/PDF/Publikationen/Agenda_Quantensysteme_2030_web_C1.pdf

Schülerinnen und Schüler Vorstellungen besitzen, in denen Elektronen oder Photonen kleine (kugelförmige) Teilchen (vgl. Mashhadi & Woolnough, 1999) sind, die sich entlang definierter Trajektorien bewegen (vgl. Sayer et al., 2017). Die Folge sind Erklärungsmuster von beispielsweise folgender Form: „Am Schirm hinter dem Doppelspalt beobachtet man zwei Auftrefforte“ (Thacker, 2003) oder „Photonen müssen sich am Strahlteiler spalten, damit die beiden Hälften überlagern können“ (Marshman & Singh, 2016). In einer Studie von Mannila et al. (2002) berichten die Autoren von weniger als 30% der Lernenden, die überhaupt ein Bewusstsein für die statistische Interpretation der Experimente zu haben scheinen. Vor dem Hintergrund dieser dokumentierten Schülervorstellungen stellt sich die Frage, welche Unterschiede man bei der Vermittlung quantenphysikalischer Konzepte mit Hilfe von a) DS und b) MI hinsichtlich der Vorstellungen und des konzeptuellen Verständnisses der Lernenden bei ansonsten gleichem Vorgehen beobachten kann. Empirische Befunde hinsichtlich dieser Frage könnten erstens einen Beitrag zur Identifikation *des* zentralen Schlüsselexperiments für den Quantenphysikunterricht leisten oder zweitens Hinweise dafür liefern, *wie* beide Experimente in optimaler Weise im Unterricht kombiniert werden sollten, um einen Konzeptwechsel hin zu quantenphysikalischen Vorstellungen bei Lernenden zu fördern. Zur Klärung solcher Frage(n) erscheinen jedoch unterschiedliche Untersuchungen mit verschiedenen Studiendesigns und Erhebungsinstrumenten in der Zukunft notwendig: Wir berichten in diesem Beitrag über Resultate einer explorativen Interviewstudie, die wir zur Spezifikation der oben aufgeworfenen Fragen nutzen. Wir leiten daher aus den Ergebnissen konkrete Forschungsfragen ab und präsentierten das Studiendesign einer geplanten Folgestudie.

Ergebnisse einer explorativen Interviewstudie und abgeleitete Forschungsfragen. Im Rahmen unserer explorativen Interviewstudie wurden 25 Schülerinnen und Schüler nach dem Unterricht zur Quantenoptik nach dem Erlanger Konzept² (Bitzenbauer & Meyn, 2020) unter anderem zu den Wesenszügen *Statistisches Verhalten*³ und *Fähigkeit zur Interferenz*⁴ nach Küblbeck und Müller (2003, S. 27) befragt. Die Lernenden sollten dabei zunächst die in den Formulierungen der Wesenszüge auftretenden Elemente beschreiben und die Wesenszüge im Anschluss in eigenen Worten und mit Hilfe von Experimenten erläutern. Die Schülerantworten wurden mittels qualitativer Inhaltsanalyse (deduktiv-induktive Kategorienbildung) ausgewertet. Die Studie und ihre Ergebnisse sind bei Bitzenbauer (2020) ausführlich dargestellt. An dieser Stelle sollen nur zwei mit Bezug auf die Schlüsselexperimente relevante Beobachtungen geteilt werden:

1. Die vollständige Erläuterung des Wesenszugs *Fähigkeit zur Interferenz* gelang insgesamt 16 der 25 Befragten. Vier Lernende nutzten das MI und acht Lernende das DSE (mit einzelnen Photonen), um zu erläutern, was mit der folgenden Teilaussage in der Formulierung des Wesenszugs gemeint ist: „[...] wenn es für das Versuchsergebnis mehr als eine klassisch denkbare Möglichkeit gibt.“
2. Eine detaillierte Typisierung (vgl. Bitzenbauer, 2020) der beobachteten Schülervorstellungen zum *Statistischen Verhalten* ergab drei Cluster von Lernenden:
 - *Cluster 1* (6 von 25), das Lernende zusammenfasst, die erläutern, dass statistische Aussagen nur für Ensembles gleichartig präparierter Quantenobjekte gelten, und dass Quantenzufall vom Zufall aus der klassischen Physik zu unterscheiden ist. Bei diesen Lernenden kann auf Grundlage der Ergebnisse von einem erfolgreichen

² In diesem Konzept lernen die Schülerinnen und Schüler sowohl das Michelson-Interferometer, als auch das Doppelspaltexperiment kennen.

³ „In der Quantenmechanik sind im Allgemeinen nur statistische Vorhersagen möglich“ (Küblbeck & Müller, 2003, S. 27).

⁴ „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‘“ (Küblbeck & Müller, 2003, S. 27).

Konzeptwechsel hin zu quantenphysikalischen Vorstellungen zur statistischen Deutung der QP ausgegangen werden.

- *Cluster 2* (13 von 25), das Lernende zusammenfasst, die ähnliche Vorstellungen aufweisen, wie die Lernenden in Cluster 1, die aber den Indeterminismus in der QP im Sinne einer Interpretation verborgener Parameter denken.
- *Cluster 3* (6 von 25), das Lernende zusammenfasst, die Wahrscheinlichkeitsaussagen in der QP ausschließlich im Sinne von Messunsicherheiten auffassen, weil „Quantenobjekte nicht besser lokalisiert werden können“. Bei diesen Lernenden muss auf Grundlage der Ergebnisse davon ausgegangen werden, dass eine (vollständige) Abkehr von deterministischen Vorstellungen nicht gelungen ist.

Dabei fällt auf (vgl. Tab. 1): Alle Lernenden aus Cluster 3 nutzten das DSE in ihren Erläuterungen zum *Statistischen Verhalten*, z.B.: „*Es ist Zufall, an welchem Ort ein einzelnes Elektron auf dem Schirm auftritt.*“ Umgekehrt argumentierten alle Befragten aus Cluster 1 mit Hilfe des Verhaltens von Einzelphotonen am Strahlteilerwürfel, wie er im MI vorkommt und in Teilen *zusätzlich* mit dem DSE, z.B.: „*Wenn man jetzt eine große Anzahl von Einzelphotonen nacheinander an den Strahlteiler schießt, werden die zwar am Ende ungefähr Hälfte-Hälfte transmittiert und reflektiert, aber man kann eben nicht für ein einzelnes Photon an sich bestimmen, ob es transmittiert oder reflektiert wird.*“

Tabelle 1 liefert einen Überblick über diese Beobachtung. Folglich stellen wir die folgende Forschungsfragen:

1. Ruft das DSE stärker mechanistisch geprägte Vorstellungen bei Lernenden hervor als das MI?⁵
2. Ruft das DSE stärker deterministisch geprägte Vorstellungen bei Lernenden hervor als das MI?⁶

In der Literatur findet man zusätzlich empirische Ergebnisse, die indizieren, dass die Vermittlung von Welcher-

Weg-Information (via Polarisation) und Einzelphotoneninterferenz im Kontext Mach-Zehnder-Interferometer Lernende beim Transfer der Konzepte auf den Kontext des DSE unterstützt (Maries & Singh, 2020). Daher stellen wir zusätzlich die folgende Forschungsfrage:

3. Hat die Reihenfolge der Präsentation der beiden Schlüsselexperimente (DSE & MI) einen Einfluss auf die entwickelten Vorstellungen Lernender zur QP?

Ausblick. Die hier berichteten Ergebnisse stellen Beobachtungen im Rahmen einer explorativen Interviewstudie dar und sind nur in kondensierter Form erläutert. Wir nutzten diese Beobachtungen zur Formulierung konkreter Forschungsfragen, deren Klärung nun in einer Laborstudie verfolgt wird (vgl. Abb. 1).

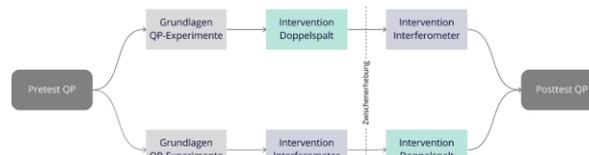


Abb. 1: Studiendesign für geplante Laborstudie.

⁵ Hypothese: Lernende, die mit dem DSE über quantenphysikalische Konzepte gelernt haben, weisen nach der Intervention stärker mechanistisch geprägte Vorstellungen auf als Lernende, die mit dem MI gelernt haben.

⁶ Hypothese: Lernende, die mit dem DSE über quantenphysikalische Konzepte gelernt haben, weisen nach der Intervention stärker deterministisch geprägte Vorstellungen auf als Lernende, die mit dem MI gelernt haben.

	Cluster A	Cluster B	Cluster C
# Befragte	6 / 25	13 / 25	6 / 25
Einbezug von ... in Überlegungen			
Doppelspalt	2 / 6	9 / 13	6 / 6
Interferometer / Strahlteiler	6 / 6	5 / 13	0 / 6

Tab. 1: Überblick über den Einbezug von DSE und MI zur Erläuterung des Wesenszugs zur statistischen Deutung der Quantenphysik durch $N = 25$ Teilnehmende an der Interviewstudie.

Literatur

- Bitzenbauer, P. (2021). Effect of an introductory quantum physics course using experiments with heralded photons on preuniversity students' conceptions about quantum physics. *Physical Review Physics Education Research*, 17, 020103.
- Bitzenbauer, P. (2020). Quantenoptik an Schulen—Studie im Mixed-Methods Design zur Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik. Berlin: Logos Verlag.
- Kalkanis, G., Hadzidaki, P. & Stavrou, D. (2003). An instructional model for a radical conceptual change towards quantum mechanics concepts, *Science Education*, 87, 257.
- Küblbeck, J. & Müller, R. (2003). *Die Wesenszüge der Quantenphysik: Modelle, Bilder, Experimente*, Köln: Aulis-Verlag Deubner.
- Leisen, J., Fries, D. & Luggen-Hölscher, J. (2000). Quantenphysik / Mikroobjekte. *Handreichung zum neuen Lehrplan Physik in der S II. PZ-Information*, 2/2000.
- Mannila, K., Koponen, I. T. & Niskanen, J. A. (2002). Building a picture of students' conceptions of wave- and particle- like properties of quantum entities, *European Journal of Physics*, 23, 45.
- Maries, A., Sayer, R. & Singh, C. (2020). Can students apply the concept of "which-path" information learned in the context of Mach-Zehnder interferometer to the double-slit experiment?, *American Journal of Physics*, 88, 542-550.
- Mashhadi, A. & Woolnough, B. (1999). Insights into students' understanding of quantum physics: visualizing quantum entities, *European Journal of Physics*, 20, 511.
- Sayer, R., Maries, A. & Singh, C. (2017). A quantum interactive learning tutorial on the double-slit experiment to improve student understanding of quantum mechanics, *Physical Review Physics Education Research*, 13(1), 010123.
- Scholz, R., Weßnig, S. & Weber, K.-A. (2020). A classical to quantum transition via key experiments, *European Journal of Physics*, 41, 055304.
- Thacker, B. A. (2003). A study of the nature of students' models of microscopic processes in the context of modern physics experiments, *American Journal of Physics*, 71, 599.
- VDI Technologiezentrum GmbH (2021). Agenda Quantensysteme. https://www.quantentechnologien.de/fileadmin/public/Redaktion/Dokumente/PDF/Publikationen/Agenda_Quantensysteme_2030_bf_C1.pdf
- Waitzmann, M., Scholz, R. & Weßnig, S. (2020). Schlüsselexperiment und Forschendes Lernen – Ein Zugang zur Quantenphysik? In: S. Habig (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Kompetenzen in der Gesellschaft von morgen. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Wien 2019*. (S. 701). Universität Duisburg-Essen.
- Weber, K.-A., Friege, G. & Scholz, R. (2020). Quantenphysik in der Schule – Was benötigen Lehrkräfte? Ergebnisse einer Delphi-Studie. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 26(1), 173-190.