

Moritz Waitzmann¹
 Rüdiger Scholz²
 Susanne Weßnigk¹

¹Leibniz Universität Hannover-
 Inst. f. Didaktik d. Mathematik u. Physik
²Leibniz Universität Hannover -
 Inst. f. Quantenoptik

Schlüsselexperiment und Forschendes Lernen– Ein Zugang zur Quantenphysik?

Theoretischer Hintergrund

„Quantenphysik ist keine klassische Physik“ (Franz & Müller, 2016). Mit dieser plakativen Aussage beschreiben Müller und Franz (2016) eine der wesentlichen Herausforderungen beim Lernen von Quantenphysik. So besitzen bspw. die klassisch geprägten Begriffe wie *Eigenschaft* oder auch das *Messen* in der Quantenphysik eine gänzlich andere Bedeutung. Bezeichnend ist das Missverhältnis zwischen der Klarheit der mathematischen Theorie und der enormen Breite des Spektrums unterschiedlicher Interpretationen (Friebe, 2018). Kurz gesagt: Quantenphysik ist keine klassische Physik!

Für das Lernen und Verstehen von Quantenphysik legt dies nahe, dass ein vergleichbar radikaler Konzeptwechsel folgen muss (Kalkanis, Hadzidaki & Stavrou, 2003). Ausgangspunkt dafür ist die Unzufriedenheit mit dem bisherigen Konzept. Gelingen kann der Wechsel, wenn das neue Konzept geeigneter und unmittelbar einleuchtend erscheint (Posner, Strike, Hewson & Gertzog, 1982). Prinzipiell wird ein Konzeptwechsel durch eine Verschiebung im Grundverständnis sowie durch neue Erklärungsmuster beobachtbar (diSessa, 2017).

Der Herausforderung, das Scheitern klassisch-physikalischer Erklärungen von quantenphysikalischen Phänomenen sowie die Fruchtbarkeit quantenphysikalischer Konzepte im Unterricht zu demonstrieren, haben sich bereits mehrere Unterrichtskonzepte angenommen. Eine Besonderheit des Münchener Unterrichtskonzeptes besteht dabei in der Auszeichnung von weitgehend konsensualen zentralen Begriffen (Müller, 2003). Die Bereitstellung dieser sogenannten Wesenszüge gelingt durch eine Reduktion der interpretatorischen Breite auf: *Stochastische Vorhersagbarkeit, Fähigkeit zur Interferenz, mögliche Messergebnisse, Komplementarität und Verschränkung* (Küblbeck & Müller, 2002; Müller, 2003). Diese Konzentration wird begleitet durch eine stark mathematikreduzierte Beschreibung von Quantenphänomenen. Die Evaluation zur Lernwirksamkeit des Unterrichtskonzeptes zeigt, dass eine solche Stärkung der Stringenz bei den Interpretationen der Theorie dazu führt, dass Lernende ein angemessenes quantenphysikalisches Grundverständnis entwickeln (Müller, 2003). Ein Konzeptwechsel wurde in diesem Zusammenhang jedoch nicht explizit untersucht.

Damit der Nachteil des hohen technischen Aufwandes umgangen und eine unproblematische Verfügbarkeit im Unterricht erreicht wird, stellen im Münchener Unterrichtskonzept Simulationen von Quantenphänomenen den Bezug zur Realität her. Allerdings hat das Realexperiment in der empirischen Wissenschaft Physik einen besonderen Stellenwert und ist heute ein unverzichtbarer Bestandteil des Unterrichts (Tesch & Duit, 2004). Dies gilt wohl auch für den Unterricht über Quantenphysik und deckt sich mit dem Wunsch der Lehrkräfte nach mehr und neuen Realexperimenten in der Schulquantenphysik (Weber, 2018). Aktuelle Vorschläge potenziell geeigneter quantenoptischer Experimente (Scholz, Friege & Weber, 2018) werden vor allem wegen eines hohen experimentellen Aufwands sowie hoher Anschaffungskosten an Schulen wenig Verbreitung finden.

Im Gegensatz zur Schule haben außerschulische Lernorte hier einen größeren Bewegungsspielraum und können komplexere Experimente anbieten, da sie auf Grund ihrer

Anbindung an Forschungseinrichtungen oder die Industrie über die notwendigen finanziellen Mittel und speziell geschultes Personal verfügen (Haupt et al., 2013).

Im Schülerlabor foeXlab des SFB 1227 DQ-mat wird ein Zugang zur Quantenphysik entwickelt, in dessen Zentrum ein quantenoptisches Realexperiment steht: Die Kombination eines optischen Strahlteiler-Experiments und einem Michelson-Interferometer (Abb.1).

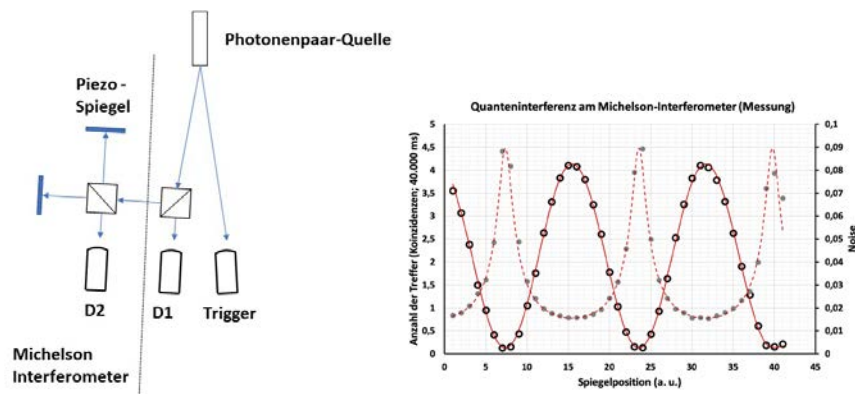


Abb.1: Links: Schematischer Aufbau des Schlüsselexperiments. Rechts: Reale Messwerte am Ausgang D2 des Interferometers (Koinzidenzen Trigger & D2; rot) und die gemessene Messunsicherheit (gestrichelt theoretisch erwartbare Werte aus der Poissonstatistik) gegen die Position des Piezo-Spiegels.

Das Ausbleiben von Photon-Koinzidenzen am Strahlteiler (Unteilbarkeit des Photons) verbunden mit der Quanteninterferenz im Michelson-Interferometer wurde bereits von Müller (2003) als geeignet angesehen, um semiklassische Sichtweisen, in Form eines naiven Welle-Teilchen-Dualismus zu vermeiden. Die in Abb.1 (rechts) dargestellten Messwerte zeigen, wie perfekt die Zählereignisse am Interferometer einer \cos^2 -Funktion folgen und somit die Quanteninterferenz **einzelner** Photonen demonstriert werden kann. Es lassen sich somit auch die Wesenszüge *Nichtlokalität* und *Superposition* demonstrieren. Das Experiment bietet aus unserer Sicht das Potenzial die „Tür zur Quantenwelt“ zu öffnen und als Schlüsselexperiment zu wirken.

Das Aufzeigen des Widerspruchs von experimentellen Daten und klassischer Erwartung sowie die Fruchtbarkeit des neuen Konzeptes Quantenphysik reicht allerdings nicht aus (Widodo & Duit, 2005). Vielmehr bedarf es einer aktiven Auseinandersetzung der Lernenden mit dem Lerngegenstand (ebd.), vor allem auch im Sinne einer als erfolgreich erlebten Anwendung des neuen Konzeptes.

Eine aktive und eigenständige Auseinandersetzung mit dem Lerngegenstand wird in Schülerlaboren stärker unterstützt, da sie Lernenden mehr Raum und Zeit dafür geben (Euler & Weßnigk, 2011). Das Forschende Lernen weist dafür methodische Möglichkeiten auf, da die Lernenden zu aktiven Gestaltern des eigenen Lernens werden (Furtak, Seidel, Iverson & Briggs, 2012).

Aus theoretischer Sicht lässt die Verbindung von Forschendem Lernen als Methode und dem Schlüsselexperiment als Lerngegenstand auf einen gelingenden Konzeptwechsel hoffen. Inwieweit ein solcher Einfluss auf den Konzeptwechsel tatsächlich besteht ist unbekannt.

Forschungsdiesiderata und Forschungsfragen

Quantenoptische Realexperimente werden als geeignet eingestuft, um einen Weg in die Quantenphysik zu ebnen (Scholz et al., 2018). Inwieweit es tatsächlich gelingt, einen Konzeptwechsel zu motivieren, ist bisher nicht bekannt. Ob sich und inwieweit sich die

Methode des Forschenden Lernens positiv auf den Konzeptwechsel im Umgang mit dem Schlüsselexperiment auswirkt, ist ebenfalls unbekannt. Daher sollen die folgenden Forschungsfragen untersucht werden:

FF1: In welchem Umfang führt die Beschäftigung mit dem Schlüsselexperiment zu einem Konzeptwechsel von klassischer Physik zu Quantenphysik?

FF1.1: Inwieweit motiviert die Beschäftigung mit dem Schlüsselexperiment zu einer Unzufriedenheit mit dem Konzept Wellenoptik?

FF1.2: Inwieweit gelingt Lernenden die Anwendungen der Erkenntnisse aus dem Schlüsselexperiment zur Erklärung von Experimenten mit dem Mach-Zehnder Interferometer?

FF2: Welche spezifischen Aspekte Forschenden Lernens können bei der Beschäftigung mit dem Schlüsselexperiment realisiert werden?

FF3: Inwieweit beeinflusst der Grad der Offenheit Forschenden Lernens den Konzeptwechsel der Lernenden bei der Beschäftigung mit dem Schlüsselexperiment?

Untersuchungsdesign

Um den Konzeptwechsel zu untersuchen, werden qualitative und quantitative Daten erhoben:

Mit einem schriftlichen Pre-Post-Test sollen das Konzeptverständnis und die Erklärung der Quantenphänomene untersucht werden. Für diesen Test wird auf bisher publizierte Multiple-Choice Items zu den Themengebieten Superposition und

Wahrscheinlichkeitsamplituden, Quantenverhalten von Photonen, Messprozess und Vorwissen zur Wellenoptik zurückgegriffen. Die Items sollen nach qualitativen Studien zur Validierung (Abb.3) in einer Pilotstudie Rasch-skaliert werden, um den Wechsel des Konzeptverständnisses, als einen Wechsel der Personenfähigkeit abzubilden (Planinic, Boone, Susac, & Ivanjek, 2019).

Auch während der Arbeit am Schlüsselexperiment sollen qualitative Daten, in Form von Audioprotokollen gesammelt werden, um den Wechsel von Erklärungsmustern zu identifizieren, und um zu sehen, wie weit eine Unzufriedenheit mit Konzepten der klassischen Physik vorliegt.

Zur Beobachtung der Aktivitäten Forschenden Lernens wurde bereits ein Beobachtungsinstrument entwickelt, mit dessen Hilfe die Schüleraktivitäten gegen die Zeit abgebildet werden können. Ausgangspunkt ist das 5E-Modell (Bybee et al., 2006), welches mit Hilfe des Aktivitätenmodells von Bell (2007) operationalisiert und anschließend validiert wurde (Waitzmann, 2018; Waitzmann, Scholz, & Weßnik, im Druck).

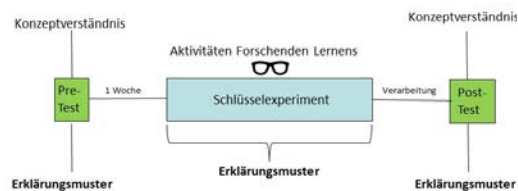


Abb.2: Untersuchungsdesign. Aufnahme qualitativer Daten wurde dick gedruckt



Abb.3: Vorgehen zur Validierung

We acknowledge financial support from DFG through CRC 1227 (DQ-mat), project Ö

Literatur

- Bell, T. (2007). Entdeckendes und forschendes Lernen. In S. Mikelskis-Seifert & T. Rabe (Hrsg.), *Physik-Methodik. Handbuch für die Sekundarstufe I und II*. Berlin: Cornelsen Verlag.
- Bybee, R. W., Taylor, J. A., Gardner, A., van Scotter, P., Carlson Powell, J., Westbrook, A., & Landes, N. (2006). *The BSCS 5E Instructional Model: Origins and Effectiveness*. Bradley Stoke. Abgerufen von: <http://www.fremont.org/ourpages/auto/2008/5/11/1210522036057/bcs5efullreport2006.pdf> (09.10.19)
- DiSessa, A. A. (2017). Conceptual Change in a Microcosm: Comparative Learning Analysis of a Learning Event. *Human Development*, 60(1), 1–37. DOI: 10.1159/000469693
- Euler, M., & Weßnig, S. (2011). Lernen durch Forschen und Entwickeln: Schülerlabore und die Förderung kreativer Potenziale. *Plus Lucis*. (1-2), 32–38.
- Franz, T., & Müller, R. (2016). Quantenphysik: Trends und Herausforderung. *Plus Lucis*. (02), 19–22.
- Friebe, C. (2018). Messproblem, Minimal- und Kollapsinterpretation. In C. Friebe, M. Kuhlmann, H. Lyre, P. M. Näger, O. Passon, & M. Stöckler (Hrsg.), *Lehrbuch. Philosophie der Quantenphysik: Zentrale Begriffe, Probleme, Positionen* (2. Ausgabe, S. 41–74). Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.
- Furtak, E. M., Seidel, T., Iverson, H., & Briggs, D. C. (2012). Experimental and Quasi-Experimental Studies of Inquiry-Based Science Teaching: A Meta-Analysis. *Review of Educational Research*, 82(3), 300–329. DOI: 10.3102/0034654312457206
- Haupt, O. J., Domjahn, J., Martin Ulrike, Siebke-Corrette, P., Vorst, S., Zehren, W., & Hempelmann, R. (2013). Schülerlabor: Begriffsschärfung und Kategorisierung. *MNU-Journal*, 66(6), 324–330.
- Kalkanis, G., Hadzidaki, P., & Stavrou, D. (2003). An instructional model for a radical conceptual change towards quantum mechanics concepts. *Science Education*, 87(2), 257–280. DOI: 10.1002/sce.10033
- Küblbeck, J., & Müller, R. (2002). *Die Wesenszüge der Quantenphysik: Modelle, Bilder und Experimente. Praxis-Schriftenreihe Abteilung Physik: Vol. 60*. Köln: Aulis-Verl. Deubner.
- Müller, R. (2003). *Quantenphysik in der Schule. Studien zum Physiklernen: Band. 26*. Berlin: Logos-Verl.
- Planinic, M., Boone, W. J., Susac, A., & Ivanjek, L. (2019). Rasch analysis in physics education research: Why measurement matters. *Physical Review Physics Education Research*, 15(2), 23. DOI: 10.1103/PhysRevPhysEducRes.15.020111
- Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., & Gertzog, W. A. (1982). Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66(2), 211–227. DOI: 10.1002/sce.3730660207
- Scholz, R., Friege, G., & Weber, K.-A. (2018). Undergraduate quantum optics: experimental steps to quantum physics. *European Journal of Physics*, 39(5), 55301.
- Tesch, M., & Duit, R. (2004). Experimentieren im Physikunterricht: Ergebnisse einer Videostudie. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 10.
- Waitzmann, M. (2018). *Forschendes Lernen im Schülerlabor foeXlab* (Unveröffentlichte Masterarbeit). Leibniz Universität, Hannover.
- Waitzmann, M., Scholz, R., & Weßnig, S. (im Druck). Forschendes Lernen identifizieren und abbilden. *MNU-Journal*.
- Weber, K.-A. (2018). *Quantenoptik in der Lehrerbildung. Studien zum Physik- und Chemielernen: Band 269*. Berlin: Logos-Verl.
- Widodo, A., & Duit, R. (2005). Konstruktivistische Lehr-Lernsequenzen und die Praxis des Physikunterrichts. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 11, 131–146.