

Schülerakzeptanz der Ensemble- und Kopenhagener Deutung

Motivation & Hintergrund

Im Zuge der sogenannten zweiten Quantenrevolution machen moderne Quantentechnologien bedeutende Fortschritte, wodurch die Quantenphysik über ihre grundlegende theoretische Rolle hinaus an Bedeutung gewinnt (Pospiech, 2021). Das Unterrichten der Quantenphysik stellt hierbei eines der anspruchsvollsten Bildungsprojekte dar (Scholz et al., 2020). Diese Herausforderung ergibt sich unter anderem daraus, dass quantenphysikalische Phänomene weniger intuitiv sind als klassische physikalische Phänomene und experimentelle Ergebnisse scheinbar im Widerspruch zu alltäglichen Erfahrungen stehen, was die Bedeutungszuschreibung für Lernende erschwert (Boucheé et al., 2021). Viele Studien beschäftigen sich in diesem Zusammenhang mit den Lernschwierigkeiten oder der Entwicklung von Unterrichtsmaterialien zur Verbesserung des Verständnisses, während die Einbeziehung von Deutungen bisher eher vernachlässigt wurde (Baily & Finkelstein, 2015). So werden diese in der Regel implizit verwendet (Greca & Freire, 2014). Dabei können Interpretationen einen Einfluss auf die Perspektiven von Schülerinnen und Schülern haben und sollten dementsprechend explizit bei der Unterrichtsplanung berücksichtigt werden (Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017). Durchaus existiert zwar eine genaue mathematische Beschreibung der Quantenphysik. Bei der Deutung des Formalismus ist sich hingegen selbst die wissenschaftliche Gemeinschaft uneinig, und bis heute gibt es Diskussionen über die meist epistemische Interpretation (Schlosshauer et al., 2013). Auch die Ergebnisse von quantenphysikalischen Experimenten können über die statistische Beschreibung hinaus verschieden gedeutet werden. In Anbetracht der Präferenz von Lehrkräften für Realexperimente in ihrem Physikunterricht (Weber, 2018) stellt die Schülerperspektive auf die Deutung dieser Experimente einen essenziellen Untersuchungsgegenstand dar. Eine geeignete Deutungsgrundlage bietet ein Schlüsselexperiment, bei dem eine Koinzidenzmessung an den beiden Ausgängen eines Strahlteilers durchgeführt wird. Dieses Experiment dient als Nachweis für die Unteilbarkeit von Photonen, und vermag einen wesentlichen Beitrag zu leisten, mit Lernhindernissen umzugehen und quantenphysikalische Phänomene zu verstehen (Scholz et al., 2020). In der wissenschaftlichen Gemeinschaft gibt es tendenziell eine Zustimmung zur Kopenhagener Deutung (Schlosshauer et al., 2013). Sie wird auch in Lehrkontexten wie beispielsweise in dem Ansatz von Cleve (2023) eingesetzt. Nach dieser Deutung wird der Zustand eines Quantenobjekts erst durch die Messung bekannt (Weizsäcker, 1941). Dabei findet ein „Übergang vom Möglichen zum Faktischen“ statt, also von den Wahrscheinlichkeiten zu den tatsächlichen Messergebnissen während des „Beobachtungsaktes“ (Heisenberg, 1956, S. 298-299). Die Eigenschaften der Quantenobjekte werden erst durch die Wechselwirkung mit anderen Systemen zugänglich (Bohr, 1928). Diese Sichtweise stellt eine Abkehr von der klassischen Vorstellung einer objektiven Realität dar und führt zu scheinbar paradoxen Aussagen. Schrödinger entwickelte beispielsweise ein Gedankenexperiment, das später unter dem Namen „Schrödingers Katze“ bekannt wurde, um die Absurdität dieser Interpretation zu verdeutlichen (Baumann & Sexl, 1984). Mit der Ensemble-Deutung könnten diese Paradoxien vermieden werden. Sie wird ebenfalls bereits in Lehrkonzepten, wie beispielsweise in dem nach Bitzenbauer (2021), eingesetzt. Im Gegensatz zur Kopenhagener

Deutung werden hier keine Wahrscheinlichkeitsaussagen für das Einzelsystem abgeleitet, sondern es wird über ein Ensemble gleichartig präparierter Quantenobjekte gesprochen.

Ziel und Forschungsfrage

Da beide Deutungen in Lehrkontexten anzutreffen sind und sich grundlegend darin unterscheiden, inwiefern Aussagen über ein Einzelsystem getroffen werden, wurden sie für die Studie herangezogen. Ziel der Untersuchung ist es, die Akzeptanz der Schülerinnen und Schüler gegenüber den Deutungen zu erfassen, um Einblicke in deren Perspektive zu gewinnen und Hinweise für schülerorientierte Lehrangebote zu erhalten. Daraus ergibt sich folgende Forschungsfrage:

- Inwiefern akzeptieren Schülerinnen und Schüler die Deutung eines Strahlteilerexperiments mit Einzelphotonen nach der Ensemble- bzw. der Kopenhagener Variante, und worin bestehen Akzeptanzunterschiede?

Studiendesign

Die Akzeptanzbefragung ist in Anlehnung an Wodzinski (1996) als aufeinander aufbauende Abfolge von Befragungsphasen konzipiert. Zunächst erfolgte in 1:1-Interview-ähnlichen Konstellationen die Präsentation eines Informationsangebots, gefolgt von der Erhebung der Plausibilität. Als Informationsangebot diente das bereits genannte Strahlteilerexperiment, welches mit einem Quantenkoffer der Firma *qutools* realisiert und jeweils mit der Ensemble- oder Kopenhagener Deutung präsentiert wurde. Die Befragten wurden dazu aufgefordert, die Deutung hinsichtlich der Plausibilität und Verständlichkeit zu beurteilen. Anschließend sollten die Schülerinnen und Schüler zur Untersuchung der Verhaltensakzeptanz, also der praktischen Anwendung der entsprechenden Deutung, das Informationsangebot mit eigenen Worten wiedergeben. Der Versuch wurde daraufhin durch den Einsatz von Polarisationsfiltern vor und hinter dem Strahlteiler erweitert, und die Ergebnisse sollten durch die Lernenden gedeutet werden. Die gesamte Akzeptanzbefragung inklusive Informationsangebot orientierte sich dabei an entsprechenden Interviewleitfäden, die sich nur in deutungsspezifischen Aussagen unterschieden. Die Interviews wurden transkribiert und mittels strukturierender qualitativer Inhaltsanalysen nach Mayring (2015) ausgewertet. An der Studie nahmen 10 Schülerinnen und Schüler der Qualifikationsphase I aus je einem Leistungskurs (N=6) und einem Grundkurs (N=4) an zwei Gymnasien in Nordrhein-Westfalen teil. Die Probanden waren zwischen 16 und 19 Jahren alt. Die Interviews fanden in den Physikräumen der Schulen statt und dauerten jeweils 50 bis 70 Minuten.

Ergebnisse & Diskussion

Für die Auswertung und Interpretation der Daten wurde eine Auslegung des Akzeptanzkonstruktes verwendet, welches zwischen „Einstellungs- und Verhaltenskomponente“ trennt (Müller-Böling & Müller, 1986, S. 25). Die Einstellungsakzeptanz stellt hierbei dar, inwiefern die Lernenden die Deutung als plausibel erachtet haben. Sie wurde als Akzeptanzstufe (A) auf einer Skala (1= vollständig plausibel; 2 = teilweise plausibel, 3 = nicht plausibel) bewertet. Bei der Verhaltensakzeptanz wurde betrachtet, inwiefern die präsentierte Deutung verwendet wurde. Daraus ergeben sich, wie in Tab. 1 dargestellt, vier Benutzertypen. Alle Probanden und Probandinnen, denen das Einzelphotonen-Experiment unter Verwendung der Kopenhagener Deutung vorgestellt wurde, wurden als überzeugte Benutzer eingestuft. Diese Klassifizierung basiert auf der Bewertung der Kopenhagener Deutung als plausibel (A=1) und deren

Anwendung sowohl während der Paraphrasierung als auch in der Anwendungsphase. Kein Teilnehmer der Ensemble-Gruppe zeigte ein vergleichbares Verhalten. Drei Teilnehmer, die die Ensemble-Deutung als plausibel ansahen ($A=1$), wandten teilweise die Kopenhagener Deutung an und äußerten sich über ein einzelnes Photon, das im Widerspruch zur Ensemble-Deutung steht. Daher erhielten sie die Einstufung verhinderter Benutzer. Zwei weitere Teilnehmer, die die Deutung entweder teilweise oder gar nicht akzeptierten ($A=2-3$), wiesen keine Einstellungsakzeptanz auf. Eine geäußerte Kritik an der Ensemble-Variante betraf den fehlenden Lebensweltbezug und die unklare Bedeutungszuschreibung. Einer von ihnen tätigte keine Aussagen über ein einzelnes Photon und verwendete die Ensemble-Deutung, weshalb er als gezwungener Benutzer eingestuft wurde. Ein Proband der Ensemble-Gruppe lehnte die Ensemble-Deutung ab, machte Aussagen über ein Photon und nutzte die Kopenhagener Deutung, weshalb er als überzeugter Nichtbenutzer klassifiziert wurde. Tabelle 1 zeigt die beschriebene Zuteilung der Probanden in verschiedene Nutzertypen.

		Verhaltensakzeptanz (Verwendung der präsentierten Deutung)	
		ja	nein
Einstellungs- akzeptanz (Plausibilität)	ja $A=1$	<i>überzeugter Benutzer</i> 5 Kopenhagener 0 Ensemble	<i>verhinderter Benutzer</i> 0 Kopenhagener 3 Ensemble
	nein $A=2-3$	<i>gezwungener Benutzer</i> 0 Kopenhagener 1 Ensemble	<i>überzeugter Nicht-Benutzer</i> 0 Kopenhagener 1 Ensemble

Tab. 1: Klassifizierte Benutzertypen der Ensemble- und Kopenhagener Gruppe
Anmerkung. In Anlehnung an Müller-Böling & Müller (1986, S. 28).

Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten, dass die Kopenhagener Deutung bei Schülerinnen und Schülern der Sekundarstufe II eine höhere Akzeptanz in der Einstellung und Anwendung findet als die Ensemble-Deutung. Ein potenzieller Erklärungsansatz könnte darin liegen, dass es für den Lernenden gewohnter ist, über eine Entität zu sprechen, wodurch eine gewisse Vertrautheit mit dem Lerngegenstand entsteht. Hierbei könnte die Betrachtung der Verwendung von Animismen Aufschluss geben. Animistische Sprechweisen wurden ausschließlich von Schülerinnen und Schülern verwendet, denen das Experiment mit der Kopenhagener Deutung präsentiert wurde. Dies legt nahe, dass die Präsentation der Kopenhagener Deutung zur Verwendung von Animismen führt, auch wenn diese nicht explizit vermittelt werden. Die höhere Akzeptanz der Kopenhagener Deutung könnte also mit einer natürlichen Neigung zu animistischen Sprechweisen bei abstrakten Dingen zusammenhängen. So zeigte Pütttschneider (2005) in einer Interventionsstudie im Chemieunterricht, dass Animismen aufgrund ihrer Verständlichkeit zu einem nachhaltigen motivationalen Effekt führen. Um einen statistischen Vergleich zwischen den Gruppen zu erhalten, erscheint es ratsam, die Akzeptanz zukünftig quantitativ zu erfassen.

Literatur

- Baily, C. & Finkelstein, N. D. (2015). Teaching quantum interpretations: Revisiting the goals and practices of introductory quantum physics courses. *Physical Review Special Topics. Physics Education Research*, 11(2), 020124. <https://doi.org/10.1103/physrevstper.11.020124>
- Baumann, K., Sexl, R.U. (1984). Paradoxien tauchen auf. In K. Baumann & R. U. Sexl (Hrsg.), *Die Deutungen der Quantentheorie*. (S. 24–29). Springer Fachmedien. https://doi.org/10.1007/978-3-663-14179-2_2
- Bitzenbauer, P. (2021). Practitioners' views on new teaching material for introducing quantum optics in secondary schools. *Physics Education*, 56(5), 055008. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/ac0809>
- Bohr, N. (1928). Das Quantenpostulat und die neuere Entwicklung der Atomistik. *The Science Of Nature*, 16(15), 245–257. <https://doi.org/10.1007/bf01504968>
- Bouchée, T., De Putter Smits, L., Thurlings, M. & Pepin, B. (2021). Towards a better understanding of conceptual difficulties in introductory quantum physics courses. *Studies in Science Education*, 58(2), 183–202. <https://doi.org/10.1080/03057267.2021.1963579>
- Cleve, J. N. (2023). *Die Wesenszüge der Quantenphysik qualitativ und quantitativ – Entwicklung eines Lehrgangs zu Experimenten mit dem Quantenkoffer* (Masterarbeit, Ruhr-Universität Bochum). https://dp.physik.ruhr-uni-bochum.de/wp-content/uploads/sites/7/2023/09/Masterarbeit_Jan-Niklas_Cleve.pdf
- Greca, I.M. & Freire, O. (2014). *Meeting the Challenge: Quantum Physics in Introductory Physics Courses*. In M. Matthews, M. (Hrsg.), *International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching* (S. 183–209). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7654-8_7
- Heisenberg, W. (1956). Die Entwicklung der Deutung der Quantentheorie. *Physikalische Blätter*, 12(7), 289–304. <https://doi.org/10.1002/phbl.19560120701>
- Krijtenburg-Lewerissa, K., Pol, H. J., Brinkman, A. & Van Joolingen, W. (2017). Insights into teaching quantum mechanics in secondary and lower undergraduate education. *Physical Review. Physics Education Research*, 13, 010109. <https://doi.org/10.1103/physrevphyseducres.13.010109>
- Mayring, P. (2015). *Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken*. Beltz
- Müller-Böling, D. & Müller, M. (1986). *Akzeptanzfaktoren der Bürokommunikation*. Oldenbourg.
- Pospiech, G. (2021). Quantum Cryptography as an Approach for Teaching Quantum Physics. In *Challenges in physics education* (S. 19–31). https://doi.org/10.1007/978-3-030-78720-2_2
- Püttchneider, M. (2005). *Die Rolle des Animismus bei der Vermittlung chemischer Sachverhalte: eine Interventionsstudie am teutolab der Universität Bielefeld*. (Dissertation, Universität Bielefeld). Cuvillier Verlag.
- Qutools (o.D.). Quantenkoffer. https://qutools.com/quantenkoffer_science-kit/
- Scholz, R., Wessnigk, S. & Weber, K. (2020). A classical to quantum transition via key experiments. *European Journal Of Physics*, 41(5), 055304. <https://doi.org/10.1088/1361-6404/ab8e52>
- Schlosshauer, M., Kofler, J. & Zeilinger, A. (2013). A snapshot of foundational attitudes toward quantum mechanics. *Studies in History And Philosophy Of Science. Part B Studies in History And Philosophy Of Modern Physics*, 44(3), 222–230. <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2013.04.004>
- Weber K.-A. (2018). *Quantenoptik in der Lehrerfortbildung. Ein bedarfsgeprägtes Fortbildungskonzept zum Quantenobjekt „Photon“ mit Realexperimenten*. (Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover). Logos-Verlag
- Weizsäcker, C.F. (1941). Zur Deutung der Quantenmechanik. *Zeitschrift für Physik* 118, 489–509. <https://doi.org/10.1007/BF01342929>
- Wodzinski, R. (1996). *Untersuchungen von Lernprozessen beim Lernen Newtonscher Dynamik im Anfangsunterricht* (Dissertation, Universität Frankfurt). LIT.