

Evaluation eines Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik mit Einzelphotonenexperimenten – Ergebnisse einer Pilotstudie

Das Unterrichtskonzept zur Quantenoptik

Dem Konzept liegt das Experiment aus der Publikation von Grangier et al. (Grangier, Roger, & Aspect, 1986) zugrunde, mit dem gleichzeitig die Unteilbarkeit von Photonen als auch die Einzelphotoneninterferenz gezeigt werden kann. Die Ergebnisse dieses Experiments führen dazu, dass die Vorstellung des Photons als lokalisierbares Teilchen fallen gelassen werden muss. Gegliedert ist das Unterrichtskonzept in vier Kapitel, die in insgesamt vier Schulstunden unterrichtet werden. Am Beispiel des Quantenobjekts „Photon“ können damit Wesenszüge der Quantenphysik (Küblbeck & Müller, 2007) vermittelt werden:

- Kapitel 1: Einzelphotonendetektoren
- Kapitel 2: Koinzidenzmessung
- Kapitel 3: Unteilbarkeit von Photonen
- Kapitel 4: Einzelphotoneninterferenz

Details zum Konzept findet man bei Bitzenbauer & Meyn (2019).

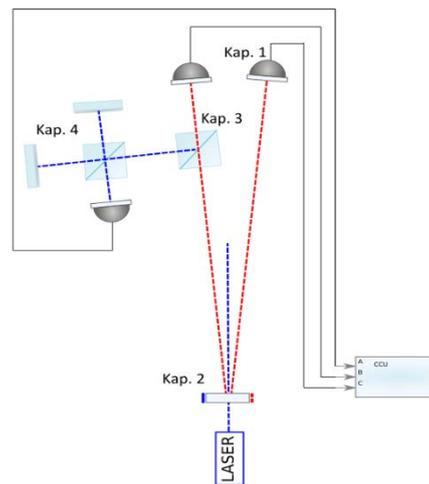


Abb. 1: Schematische Darstellung des Experiments von Grangier et al. (1986).

Forschungsdesign und Methodik

Zur Evaluation der entwickelten Elementarisierungen quantenoptischer Konzepte wurden Teaching Experiments mit $N = 13$ Schülerinnen und Schülern der gym. Oberstufe durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass insbesondere die Erklärung der Funktionsweise von Einzelphotonendetektoren in Analogie zum Entstehen und zum Abgang einer Schneelawine von den Schülerinnen und Schülern durchweg sehr gut akzeptiert und als hilfreich empfunden wurde. Auch die Erläuterungen zur Koinzidenzmessung als Grundlage von Einzelphotonenexperimenten sowie die Erklärung zum Antikorrelationsfaktor α stießen auf mittlere bis gute Akzeptanzwerte. Die Paraphrasierungen als Teil der Teaching Experiments konnten von der überwiegenden Zahl der Schülerinnen und Schülern mit mindestens zufriedenstellender Qualität wiedergegeben werden. Mit diesen qualitativen Ergebnissen liegen Indizien vor, dass die Experimente mit den entwickelten Erklärungen für Schülerinnen und Schüler verständlich sind und es wurden nur kleinere Änderungen am Konzept vorgenommen. Die Akzeptanzbefragungen ermöglichen überdies die Untersuchung von Schülervorstellungen, die durch das neue Konzept gefördert werden.

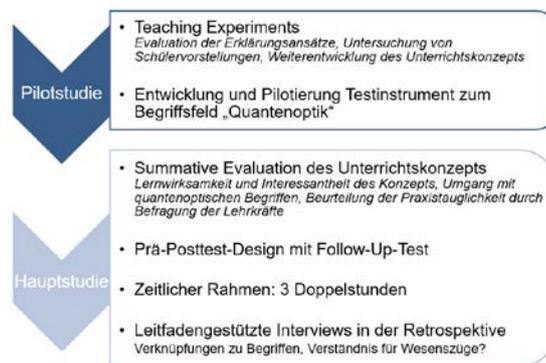


Abb. 2: Übersicht über das Studiendesign.

Auf Grundlage der Erkenntnisse aus den Teaching Experiments folgt eine summative Evaluation des Unterrichtskonzepts im Prä-Posttest-Design mit Follow-Up-Test. Zusätzlich soll mit Hilfe einer Befragung von Lehrkräften die Praxistauglichkeit des Konzepts evaluiert werden und leitfadengestützte Interviews in der Retrospektive sollen zeigen, inwiefern Schülerinnen und Schüler ein elaboriertes Verständnis bis hin zu den Wesenszügen der Quantenphysik erwerben.

Entwicklung eines Testinstruments zur Quantenoptik

Damit die Zusammenstellung der Prüfungsfragen die Inhaltsbereiche der Intervention gut abbildet, wurde zunächst ein Blueprint nach Flateby (2013) entwickelt; dabei handelt es sich um eine Themenmatrix, die Inhaltsbereiche der Intervention einerseits und die in diesen Themen zu erreichenden Lernniveaus der Schülerinnen und Schüler andererseits beinhaltet und nach Relevanz gewichtet (Krebs, 2008). Zu den jeweiligen Inhaltsbereichen wurden zunächst 21 Items im offenen Format formuliert. Um sinnvolle Distraktoren zu finden, wurden diese an $N = 23$ Lehramtsstudierende gegeben. Häufig auftauchende Fehler oder solche Antworten, die inhaltlich nah an der richtigen Lösung sind, können als plausible Distraktoren für das Testinstrument extrahiert werden; dieses Vorgehen ist in der fachdidaktischen Forschung verbreitet (Schnell, Hill, & Esser, 2018) – insbesondere wenn keine Befunde zur Schülervorstellungen vorliegen.

Bei geschlossenen Aufgabenformaten decken die Antwortmöglichkeiten mitunter nicht alle denkbaren Reaktionen der Probandinnen und Probanden ab, beeinflussen sich gegenseitig oder entsprechen nicht der natürlichen Antwort der Befragten (ebd.), was sich negativ auf die Validität auswirken kann (Rost, 2004). Eine gängige Methode zur Überprüfung der Qualität von Testaufgaben ist die des „Lauten Denkens“, die unabhängig vom Aufgabenformat eingesetzt werden kann (Hadenfeldt, Repinning, & Neumann, 2014). Im Zuge der Pilotierung des Testinstruments wurde die Methode des „Lauten Denkens“ vorrangig zur Optimierung der Aufgabengüte und damit zur Verbesserung der Validität auf Item-Ebene mit $N = 13$ Oberstufenschülerinnen und -schülern durchgeführt. Am Anfang stand eine Instruktion zum Lauten Denken, die in Anlehnung an Mackensen-Friedrichs (2004) formuliert wurde, um eine standardisierte Durchführung der Methode sicherzustellen (Sandmann, 2014). Die „Laute Denken“-Erhebung führte zur sprachlichen Überarbeitung aller Items und drei Items sind zusätzlich entstanden.

Beim Bearbeiten des Tests ist jeweils zusätzlich zum Kreuz bei der richtigen der drei Aussagen, die eigene Sicherheit beim Ankreuzen anzugeben. Ein Punkt wird nur vergeben, wenn die Antwort richtig und der Proband sich mindestens sicher ist. Dadurch soll der Rateeinfluss minimiert werden und außerdem werden zusätzliche Auswertemöglichkeiten geschaffen. Mit dem Test wird nicht das Ziel verfolgt „die“ Quantenoptik als Konstrukt zu messen; stattdessen geht es um zentrale Begriffe zu unterschiedlichen Teilgebieten der Quantenoptik. Zunächst wird also damit untersucht, inwiefern das entwickelte Unterrichtskonzept dazu beiträgt, dass Schülerinnen und Schüler sich im Begriffsfeld der Quantenoptik bewegen können und inwiefern sie sich im Umgang mit den Begriffen sicher sind. Tiefergehende Verknüpfungen zwischen den Begriffen, Elaborationen und Bezüge zu den Wesenszügen der Quantenphysik werden in leitfadengestützten Interviews erhoben.

Ausgewählte Ergebnisse der Pilotstudie

Für eine Itemanalyse wurde eine Pilotstudie mit insgesamt $N = 100$ StudienanfängerInnen der Ingenieurwissenschaften durchgeführt, wobei 86 vollständige Prä-Posttestpaare vorliegen. 73 der Teilnehmer waren männlich. Items mit einer Itemschwierigkeit $< .2$ bzw. $> .8$ wurden genauso eliminiert, wie Items mit Trennschärfen unter $.3$ (Neuhaus & Braun, 2007). Übrig bleibt ein Itemset bestehend aus 13 Items. Alle haben Trennschärfen oberhalb von $.3$, teilweise liegen diese sogar im guten Bereich $> .5$ (Fisseni, 2004). Cronbach's Alpha als Maß für die

interne Konsistenz des Testinstruments beträgt $\alpha = .78$. Die Split-Half-Reliabilität liegt bei $r = .71$. Ein Argument für Kriteriumsvalidität sind signifikante Korrelationen des Posttestergebnisses mit den Außenkriterien „Durchschnittsnote Physik“ mit $r = -.47$ ($p < 0.01$) sowie dem „Interesse an Quantenphysik“ mit $r = -.41$ ($p < 0.01$). Eine konfirmatorische Faktorenanalyse bestätigt die dreifaktorielle Struktur des Testinstruments, sodass die drei Subskalen „Einzelfotonenexperimente“ ($\alpha = .53$), „Photonen“ ($\alpha = .61$) und „Theoretische Aspekte“ ($\alpha = .61$) empirisch trennbar sind ($\chi^2/df = 0.83$, $p < 0.001$, $CFI = 1.00$, $RMSEA = 0.00$, $SRMR = 0.063$). Die Inhaltsvalidität wurde neben einer Lehrplananalyse mittels eines Expertenratings ($N = 8$) gesichert.

Zum Vergleich von Prätestergebnis ($m = 3.12$; $SD = 2.24$) und Posttestergebnis ($m = 5.94$; $SD = 3.15$) wurde ein nichtparametrischer Wilcoxon-Test für verbundene Stichproben gerechnet. Dieser zeigt einen signifikanten Lernzuwachs mit großer Effektstärke ($Z(N = 86) = -7.13$, $p < .001$, $d = 3.73$). Teilt man die Stichprobe nach Leistungsterzilen (abhängig vom Prätestergebnis) auf, so zeigt eine Analyse des absoluten Lernzuwachses, dass dieser für die leistungsstärkeren Probanden ($m = 2.21$, $SD = 2.17$) niedriger ist als für Leistungsschwächere ($m = 3.00$, $SD = 2.66$), sodass ein höherer Lernzuwachs nicht auf ein höheres Vorwissen zurückzuführen ist.

Beim Ankreuzen im Posttest sind die ProbandInnen signifikant sicherer als im Prätest ($Z(N = 86) = -8.0$, $p < 0.001$, $d = 3.43$); insbesondere werden sie bei allen Items im Posttest signifikant sicherer, bis auf bei einem Item, bei dem mit dem atomaren Energieübergang ein Inhalt abgefragt wird, der nicht explizit Teil des Unterrichtskonzepts ist; geschlechterspezifische Unterschiede sind nach einem Mann-Whitney-U-Test nicht statistisch signifikant ($U = 663.00$, $p = 0.76$). Es zeigt sich ein hoch signifikanter Zusammenhang zwischen der mittleren Sicherheit der Probanden im Posttest und ihrer Durchschnittsnote in Physik ($r = .33$, $p = .002$).

Untersucht man den absoluten Lernzuwachs in Abhängigkeit vom angegebenen Interesse an Quantenphysik, so zeigt sich, dass die (sehr) interessierten ProbandInnen im Mittel einen höheren Lernzuwachs vorweisen, als die weniger Interessierten. Überraschend ist aber, dass die nicht und gar nicht Interessierten einen ebenso hohen Lernzuwachs zeigen, wie die sehr Interessierten. Hier ist in der Hauptuntersuchung die Frage zu klären, ob mit dem qualitativen Konzept insbesondere die an Physik weniger Interessierten und leistungsschwächeren Schülerinnen und Schüler erreicht werden.

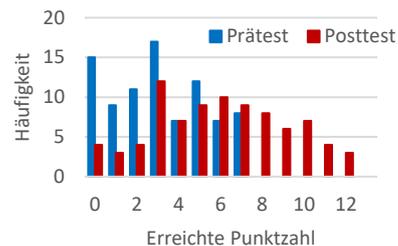


Abbildung 3: Testergebnisse im Prä-Posttestvergleich.

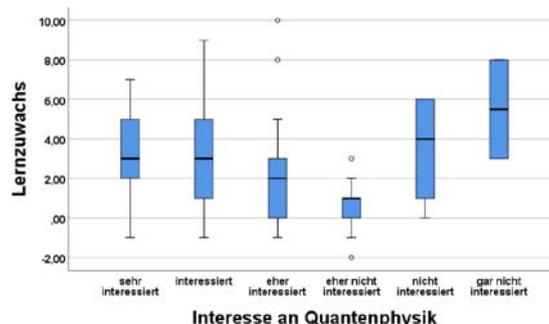


Abbildung 4: Lernzuwachs in Abhängigkeit vom Interesse an Quantenphysik.

Literatur

- Bitzenbauer, P., & Meyn, J.-P. (2019). Quantenphysik greifbar unterrichten. Plus Lucis.
- Fisseni, H.-J. (2004). Lehrbuch der psychologischen Diagnostik. Hogrefe.
- Flateby, T. L. (2013). A Guide for Writing and Improving Achievement Tests. University of South Florida.
- Glug, I. (2009). Entwicklung und Validierung eines Multiple-Choice-Tests zur Erfassung prozessbezogener naturwissenschaftlicher Grundbildung. Kiel.
- Grangier, P., Roger, G., & Aspect, A. (1986). Experimental evidence for a photon anticorrelation effect on a beam splitter: a new light on single-photon interference. *Europhysics Letters*.
- Hadenfeldt, J., Repinning, B., & Neumann, K. (2014). Die kognitive Validität von Ordered Multiple Choice Aufgaben zur Erfassung des Verständnisses von Materie. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*.
- Krebs, R. (2008). Multiple Choice Fragen? Ja, aber richtig. Medizinische Fakultät; Institut für Medizinische Lehre IML; Abteilung für Assessment- und Evaluation AAE. Bern.
- Küblbeck, J., & Müller, R. (2007). Die Wesenszüge der Quantenphysik. Aulis.
- Mackensen-Friedrichs, I. (2004). Förderung des Expertiseerwerbs durch das Lernen mit Beispielaufgaben im Biologieunterricht der Klasse 9. Kiel.
- Neuhaus, B., & Braun, E. (2007). Testkonstruktion und Erhebungsstrategien – praktische Tipps für empirisch arbeitende Didaktiker. In H. Bayrhuber, *Kompetenzentwicklung und Assessment* (S. 135-165). Innsbruck: Studienverlag.
- Rost, J. (2004). *Lehrbuch Testtheorie - Testkonstruktion*. Bern u.a.: Verlag Hans Huber.
- Sandmann, A. (2014). Lautes Denken – die Analyse von Denk-, Lern- und Problemlöseprozessen. In D. Krüger, I. Parchmann, & H. Schecker, *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 179-188). Springer.
- Schnell, R., Hill, P. B., & Esser, E. (2018). *Methoden der empirischen Sozialforschung*. De Gruyter.