

Von Koinzidenzen zu Wesenszügen der Quantenphysik

- Erste Ergebnisse einer summativen Evaluation des
Erlanger Unterrichtskonzepts
zur Quantenoptik -

Philipp Bitzenbauer, Jan-Peter Meyn

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
philipp.bitzenbauer@fau.de

Kurzfassung

Mit dem Erlanger Unterrichtskonzept zur Quantenoptik wird das Ziel verfolgt, eine moderne Sichtweise auf die Quantenphysik zu vermitteln. Lernende sollen anschlussfähiges Wissen bis hin zu den Wesenszügen der Quantenphysik aufbauen. Im Rahmen einer summativen Evaluation mit Schülerinnen und Schülern der gymnasialen Oberstufe wird das Konzept evaluiert. Ein mixed-methods-Ansatz wurde gewählt, um verschiedene Perspektiven auf die Lernprozesse nachzeichnen zu können. Erste Ergebnisse aus einem Fragebogen zum deklarativen Wissen in Quantenoptik im Prä-Post-Follow-Up-Testdesign sowie einem Vorstellungsfragebogen zur Quantenphysik werden vorgestellt. Es zeigt sich: Lernende gelangen zu einem angemessenen Begriffsverständnis zur Quantenoptik und bauen ein überwiegend adäquates Verständnis der Wesenszüge auf, aber eine Teilchenvorstellung von Photonen scheint stabil zu sein.

1. Quantenphysik in der Schule

Die Entwicklung moderner Technologien profitiert heute und noch mehr in Zukunft von der Quantenphysik. Quantentechnologien der zweiten Generation, die Quanteneffekte, wie die Verschränkung direkt ausnutzen, spielen eine immer größere Rolle, gerade in der universitären Ausbildung [1].

Diese Entwicklungen und die an Schulen üblicherweise behandelten Inhalte zur Quantenphysik klaffen deutlich auseinander: Der gängige Quantenphysikunterricht stellt nach wie vor Diskussionen um einen Welle-Teilchen-Dualismus ins Zentrum [2] und skizziert historische Entwicklungen der Quantenphysik nach. Eine von Staderman et al. [3] durchgeführte Lehrplananalyse von Quantenphysikcurricula aus fünfzehn unterschiedlichen Ländern zeigt, dass Inhaltsbereiche, wie der Welle-Teilchen-Dualismus, Materiewellen, diskrete Energieniveaus oder das Bohr'sche Atommodell nach wie vor key-Items darstellen. Fundamentale Aspekte der Quantenphysik, wie beispielsweise die Verschränkung, werden hingegen nur selten in Lehrplänen aufgeführt.

Der Großteil der Curricula, stellt den Stand der physikalischen Diskussion in den 1930er Jahren dar [4],

obwohl erst die Ergebnisse aus quantenoptischen Experimenten zu einer veränderten Sichtweise auf die Quantenphysik geführt haben. Dazu zählen vor allem die Ergebnisse aus Experimenten zu Effekten, die nicht (semi-)klassisch erklärbar sind, z.B. mit einzelnen Quantenobjekten [5, 6].

Für die universitäre Ausbildung existieren bereits eine Reihe von Quantenoptik-Labore zu Einzelphotonen-Experimenten mit dem Ziel der Vermittlung eines modernen Bilds von Quantenphysik, z.B. [7, 8, 9]. In der Schule sind solche Experimente nicht im Einsatz. Hohe Kosten, oder ein hoher Justageaufwand beim Aufbau solcher Experimente verhindern einen praxistauglichen Einsatz im Schulalltag [10]. Bronner entwickelte vor diesem Hintergrund interaktive Bildschirmexperimente (IBEs) [11]: diese ermöglichen die Darstellung von Einzelphotonenexperimenten in authentischen Laborsituationen auch im Klassenzimmer. Sie stellen daher eine geeignete Alternative zum Realexperiment dar.

Der nächste logische Schritt ist nun die Implementation dieser experimentell verfügbaren Zugänge auch in die Quantenphysikausbildung an Schulen. Hier setzt dieser Artikel an.

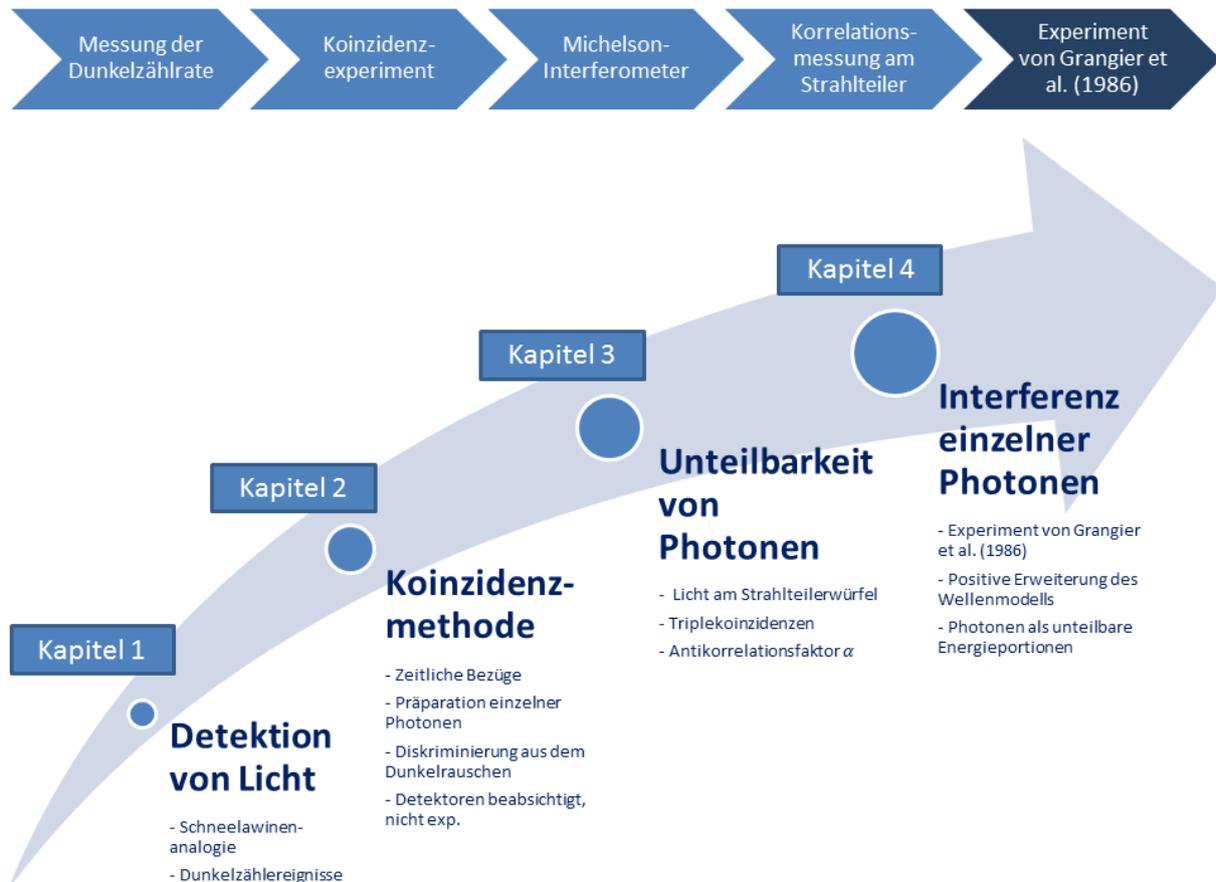


Abb. 1: Das Erlanger Unterrichtskonzept gliedert sich vier Unterrichtsstunden. In den ersten beiden Stunden stehen technische Aspekte und die Messmethodik im Zentrum, bevor in den darauffolgenden Stunden die Ergebnisse quantenoptischer Experimente behandelt werden. Die obere Leiste zeigt die nacheinander in IBEs thematisierten Experimente.

2. Das Erlanger Unterrichtskonzept zur Quantenoptik

Mit dem Erlanger Unterrichtskonzept zur Quantenoptik soll ein Vorschlag gemacht werden: ausgehend von Erkenntnissen aus modernen quantenoptischen Experimenten, sollen die Lernenden zu einem qualitativen Verständnis für die Wesenszüge der Quantenphysik [12] geführt werden. Das Konzept stellt einen Konsens aus den folgenden Leitlinien dar:

- Moderne Erkenntnisse zur Quantenphysik aus Realexperimenten moderner Forschungslabore
- Qualitative Vermittlung der Wesenszüge der Quantenphysik
- Praxistauglicher Vorschlag für den Unterricht durch Einbindung interaktiver Bildschirmexperimente

Das Erlanger Unterrichtskonzept ist für die Sekundarstufe II entwickelt und kann in vier Unterrichtsstunden durchgeführt werden (vgl. Abb. 1). Es stellt daher ein randbedingungsfreies Angebot für die Unterrichtspraxis dar.

Die wichtigsten Grundideen sind die Folgenden:

- Verhinderung mechanistischer Sprech- und Denkweisen: der Verzicht auf einen Welle-Teilchen-Dualismus macht eine Diskussion über den mechanistischen Bahnbegriff in der Quantenphysik überflüssig und die Eigenschaft „Ort“ in der Quantenphysik wird besonders thematisiert
- Präparationsbegriff statt Sender-Empfänger-Vorstellung: Statt von Photonenquellen zu sprechen, wird die Präparation von Quantenzuständen durch Koinzidenzen betont.
- Ansetzen an nicht semiklassisch erklärbaren Effekten: Daten aus quantenoptischen Realexperimenten werden genutzt, um die Quantennatur des Lichts zu verstehen.
- Photonen: „Unteilbare Energieportionen des Lichts, die nicht lokalisierbar sind“, statt „Lichtteilchen“.

Details zum Konzept findet man bei [13], auch dessen formative Evaluation wurde dort berichtet. Das Design und erste Ergebnisse der summativen Evaluation des Konzepts werden hier vorgestellt.

3. Summative Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik

In der physikdidaktischen Forschung gibt es eine fortwährende Tradition der Entwicklung von Unterrichtskonzepten und Lernhilfen zur Quantenphysik. Eine große Reihe von Unterrichtskonzepten zur Quantenphysik mit unterschiedlichen Zugangstypen [14], etwa [15, 16, 17, 18, 19], sind dieser Tradition entsprungen. Deutlich unterschiedliche Schwerpunktsetzungen machen die Konzepte aber nur schwer vergleichbar. Für die Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik gilt daher:

Obwohl eine Evaluation von neuen Unterrichtsvorschlägen mit Kontroll- (KG) und Treatmentgruppe (TG) üblich ist, erscheint eine solche vergleichende Evaluation zur Untersuchung des Erlanger Unterrichtskonzepts nicht sinnvoll. Notwendig für eine sinnvolle Vergleichsuntersuchung wäre nämlich

1. ein Konsens darüber, welches Wissen und welche Kompetenzen Schülerinnen und Schüler im Unterricht zur Quantenphysik in jedem Fall erwerben sollten und
2. ein Evaluationsdesign, das keine der Gruppen – weder KG noch TG – bevorzugt, das heißt, die Lernziele der verglichenen Konzepte müssten weitgehend übereinstimmen.

Beide diese Voraussetzungen können nicht erfüllt sein, weil mit dem Erlanger Unterrichtskonzept neue Schwerpunktsetzungen und Zugänge gewählt wurden, wie sie in keinem der anderen Konzepte zu finden sind. Mit der gleichen Argumentation, wie [19], sehen wir daher von einem Kontrollgruppendesign ab.

3.1 Studiendesign und Forschungsfragen

Zur summativen Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts wurden qualitative und quantitative Methoden in einem explorativen Mixed-Methods-Design eingesetzt [20]. Zum Einsatz kamen neben leitfadengestützten Interviews auch Teile eines Vorstellungsfragebogen zur Quantenphysik aus [19], sowie ein eigens entwickeltes Testinstrument zum Begriffswissen (vgl. Abb. 2).

Die der Untersuchung zugrundeliegenden Forschungsfragen (FF) werden nachfolgend dargestellt:

FF 1: Erreichen die Lernenden durch das Unterrichtskonzept ein umfassendes Begriffsverständnis zur Quantenoptik?

- a) Führt das Unterrichtskonzept zu einem angemessenen und sicheren Begriffswissen zur Quantenoptik?
- b) Sind Schülerinnen und Schüler in der Lage mit diesem Begriffswissen zu argumentieren und Zusammenhänge herzustellen?

FF 2: Gelangen die Schülerinnen und Schüler zu einem Verständnis der Wesenszüge „Statistische Vorhersagbarkeit“ und „Fähigkeit zur Interferenz“?

FF 3: Gelangen die Schülerinnen und Schüler zu quantenphysikalisch adäquaten Vorstellungen zur Eigenschaft „Ort“ in der Quantenphysik sowie zur „Wahrscheinlichkeitsdeutung“ der Quantenphysik?

FF 4: Ergibt sich für die Lernwirksamkeit des Konzepts eine Abhängigkeit von dem Geschlecht der Lernenden, dem fachspezifischen Präterestergebnis oder von affektiven Lernendenmerkmalen?

FF 5: Wird das Konzept von den Lernenden als interessant empfunden und bewirkt das Unterrichtskonzept ein verstärktes Interesse an (Quanten-) Physik oder am Experiment in der Physik?

FF 6: Wie wird das Erlanger Unterrichtskonzept von Lehrkräften aus der Praxis beurteilt hinsichtlich der inhaltlich-methodischen Strukturierung und der Praxistauglichkeit?

Die im Rahmen des Mixed-Methods-Designs eingesetzten Forschungsmethoden dienen nicht isoliert, sondern zusammengenommen der Beantwortung dieser Forschungsfragen; dabei kommen die folgenden Skalen und Methoden zum Einsatz:

	FF 1	FF 2	FF 3	FF 4	FF 5	FF 6
Skala „Interesse an Physik“ [21]				✓	✓	
Skala „Interesse an Experimenten im Physikunterricht“ [22, 23]				✓	✓	
Skala „Aktuelles Interesse Physik“ [21, 22, 23]				✓	✓	
„Smileyabfragen“ [24]					✓	
Testinstrument Quantenoptik	✓			✓		
Vorstellungsfragebogen [19]		✓	✓			
Leitfadeninterviews	✓	✓				
Lehrkräftefragebogen						✓

Tab. 1: Darstellung der in der Studie eingesetzten Erhebungsinstrumente und Zuordnung zu den adressierten Forschungsfragen.

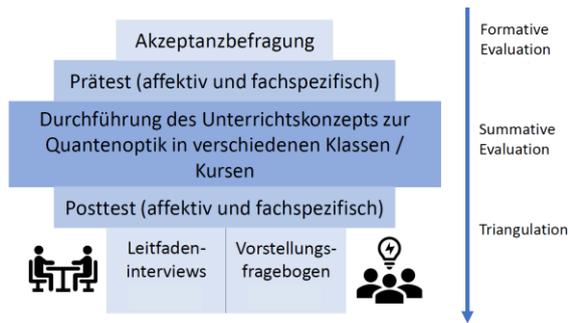


Abb. 2: Die summativ Evaluation erfolgt durch den Einsatz eines Testinstruments zum Begriffswissen in Prä-Post-Follow-Up-Testdesign unter Hinzunahme von Leitfadeninterviews und eines Vorstellungsfragebogens in einem Mixed-Methods-Design. Die so gewonnenen Daten bieten durch Triangulation einen mehrperspektivischen Blick auf die im Unterricht zur Quantenoptik mit dem Erlanger Konzept ablaufenden Lernprozesse und seine Ergebnisse [29].

3.2 Stichprobe

Insgesamt waren 171 Schülerinnen und Schüler der gymn. Oberstufe aus 12 Kursen von bayerischen Gymnasien beteiligt, davon waren 83 männlich. Die letzten beiden Zeugnisnoten Physik wurden erfragt ($m = 2.56$, $SD = 1.01$). Das Interesse an Quantenphysik konnten die Lernenden auf einer sechsstufigen Ratingskala von „sehr“ (= 1) bis „gar nicht“ (= 6) angeben ($m = 3.09$, $SD = 1.38$).

Im Testinstrument zur Quantenoptik ist von drei Antwortmöglichkeiten jeweils genau eine wahr. Einen Punkt erhalten die Schülerinnen und Schüler nur dann, wenn sie erstens die richtige Antwort ankreuzen und zweitens angeben, dass sie mindestens sicher sind. Die Befragten kreuzen dazu auf einer fünfstufigen Ratingskala zwischen „sehr sicher“ (= 1) und „geraten“ (= 5) an. Die erreichten Punktzahlen sind dadurch *tendenziell niedrig*, aber man stellt so sicher, dass man den tatsächlichen Lernzuwachs nicht überschätzt. Die Reliabilität des Testinstruments ergab sich in einer Pilotstudie zu $\alpha = .78$.

4. Ergebnisse

Wir berichten in diesem Artikel erste Ergebnisse der summativen Evaluation und zwar zum Begriffswissen Quantenoptik sowie zu den Vorstellungen zur Eigenschaft „Ort“ und der Wahrscheinlichkeitsdeutung in der Quantenphysik (vgl. FF 1a, FF 3).

4.1 Begriffswissen Quantenoptik

Die Lernenden hatten keinerlei Vorwissen zur Quantenphysik, erst recht nicht zur Quantenoptik. Dies zeigen die Prätestergebnisse: von 13 möglichen Punkten, erreichten die Probandinnen und Probanden im Mittel 1.78 ± 1.64 Punkte. Ein Friedman-Test deutet auf signifikante Unterschiede zwischen den Erhebungszeitpunkten hin ($\chi^2(2) = 174.2$, $p < .001$). Der Lernzuwachs von Prä- zu Posttest ist nach einem

Bonferroni-korrigierten Post-hoc-Test signifikant ($Z = -1.38$, $p < .001$, $r = .12$). Ein zeitverzögerter Nachtest fand ca. zwei Wochen nach der Intervention statt und zeigt einen nachhaltigen Lerneffekt; der Rückgang der erreichten Punktzahl von Post- zu Follow-Up-Test ist nach Post-hoc-Test mit Bonferroni-Korrektur nicht statistisch signifikant.

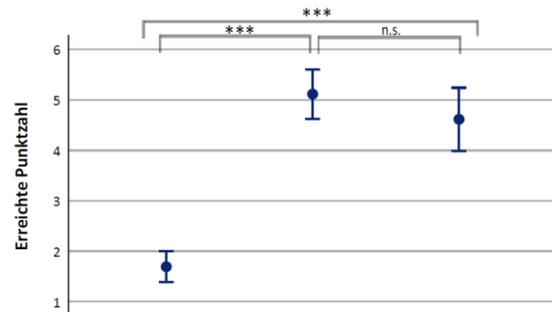


Abb. 3: Darstellung der Testergebnisse zu den Erhebungszeitpunkten.

Auch für die Ankreuzsicherheit zeigen sich zwischen den Messzeitpunkten signifikante Unterschiede ($\chi^2(2) = 184.7$, $p < .001$).

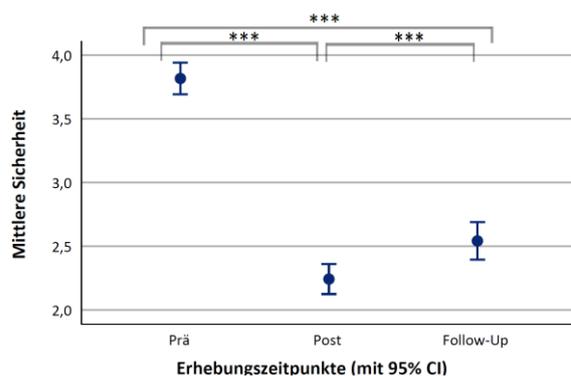


Abb. 4: Entwicklung der Sicherheit im Ankreuzverhalten.

Die subjektiv empfundene Sicherheit im Umgang mit den neuen Begriffen zur Quantenoptik steigt von Prä- zu Posttestzeitpunkt an ($Z = 1.65$, $p < .001$, $r = .14$). Anders als bei den Testergebnissen zeigt sich hier aber ein signifikanter Rückgang der Ankreuzsicherheit von Post- zu Follow-Up-Test. Dies sieht wie man mit einem Post-hoc-Test mit Bonferroni-Korrektur ($Z = -0.44$, $p < .01$), wobei die Effektstärke mit $r = .04$ nur sehr klein ist. Ein t-Test für verbundene Stichproben verdeutlicht den Befund bzgl. der Ankreuzsicherheit: In jedem der 13 Testitems antworten die Schülerinnen und Schüler im Posttest signifikant sicherer, als im Prätest ($t \in [7.4; 31.3]$, $p < 0.01$).

In welchen Wissensbereichen lernen die Schülerinnen und Schüler nun besonders dazu? Oder anders gefragt: Auf welche Items ist der deutliche Lernzuwachs im Prä-Post-Vergleich primär zurückzuführen? Um diese Frage zu klären, ist die Faktorstruktur des Tests zum Begriffswissen entscheidend: Eine dreifaktorielle Struktur des Testinstruments mit den

empirisch trennbaren Subskalen „Einzelphotonenexperimente“, „Photonen“ und „Theoretische Aspekte“ konnte in der Pilotstudie konfirmatorisch bestätigt werden ($\chi^2/df = 0.83$, $p < 0.001$, $CFI = 1.00$, $RMSEA = 0.00$, $SRMR = 0.063$) [25]. Es ergibt sich ein klares Bild: Der deutlichste Zuwachs von Prä- zu Posttest zeigt sich für die Subskala „Photonen“, die mit drei Items insbesondere die naive Teilchenvorstellung des Quantenobjekts Photon adressiert. Hier zeigt sich ein hoch signifikanter Lernzuwachs von Prä- zu Posttest mit hoher Effektstärke ($t = -9.72$, $p < .001$, $d = .83$): während im Prätest im Mittel nur 16% der Items dieser Skala richtig gelöst werden, lösen zum Postzeitpunkt die Lernenden im Mittel 63% der Items dieser Skala richtig und sind dabei mindestens sicher. Genauso deutlich ist aber auch: der Unterschied zwischen Post- und Follow-Up-Test wird in einem Post-hoc-Test ebenfalls statistisch zum Niveau 5% signifikant. Der Rückgang auf im Mittel 53% richtig gelöster Items fällt mit zehn Prozentpunkten so groß aus, wie für keine andere Skala. Wie konkret sehen nun die Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler, die mit dem Erlanger Unterrichtskonzept in die Quantenphysik eingeführt wurden, zum Photon aus? Diese Frage bleibt zunächst offen. Der hier vorgestellte Befund ist zur Klärung dieser Frage mit den Ergebnissen aus der Interview-Studie zu vergleichen (vgl. Abb. 2). Es müssen dazu zunächst die Vorstellungen genau kategorisiert werden, die Lernende aufbauen, die mit dem Erlanger Konzept in die Quantenphysik eingeführt werden.

Die Ursachen an sich für diesen Befund könnten vielfältig sein. Möglich wären etwa:

1. Es ergibt sich nach der Intervention eine Interferenz zwischen dem Wissen aus dem hier vorgestellten Konzept und den im vorherigen Physikunterricht vermittelten Vorstellungen¹.
2. Die vermittelte Vorstellung des Photons war nicht überzeugend genug und wurde kurz nach der Intervention wieder zugunsten einer (naiven) Teilchenvorstellung abgelegt.

Dass eine Teilchenvorstellung des Photons grundsätzlich sehr stabil ist, würde Ergebnisse anderer Studien, z.B. [26, 27] replizieren.

¹ Photonen werden in Bayern erstmals in der 9. Jahrgangsstufe im Kontext atomarer Energieanregung thematisiert.

4.2 Vorstellungen zu „Eigenschaft Ort“ und „Wahrscheinlichkeitsdeutung“ in der Quantenphysik

Der Vorstellungsfragebogen von Müller [19] ermöglicht die Erhebung von Schülervorstellungen zu verschiedenen Konzepten der Quantenphysik. In dieser Studie wurden die Skalen zum Eigenschaftsbegriff und zur Wahrscheinlichkeitsdeutung eingesetzt. Aus den Items mit Rating-Skala (1 = stimmt gar nicht bis 5 = stimmt völlig) wird ein Index ausgerechnet und auf die Skala von -100 bis 100 skaliert. Dieser soll ausdrücken, inwiefern die Vorstellungen der Befragten quantenphysikalisch adäquat sind [19]. Ein Index von 100 entspräche einer quantenphysikalischen, ein Index von -100 einer rein klassisch geprägten Vorstellung. Ein Index von 0 entspricht „weiß nicht“. Nimmt man die Skalen zum Eigenschaftsbegriff und zur Wahrscheinlichkeitsdeutung zusammen, so kann daraus ein Gesamtindex errechnet werden:

$N = 119$ Lernende bearbeiteten den Vorstellungsfragebogen, nachdem sie das Erlanger Konzept erlebt haben. Es zeigt sich, dass beinahe alle Schülerinnen und Schüler einen positiven Gesamtindex nach der Intervention erreichen, wobei die Schüler ($m = 55.04$, $SD = 32.21$) etwas besser abschneiden, als die Schülerinnen ($m = 34.56$, $SD = 28.93$).

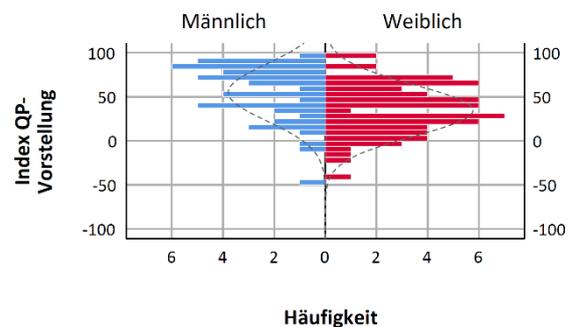


Abb. 5: Index zu QP-Vorstellungen.

Bezogen auf den Eigenschaftsbegriff in der Quantenphysik zeigt sich, dass die gerade einmal vierstündige Intervention zu quantenphysikalisch adäquaten Vorstellungen führen kann ($m = 41.01$, $SD = 35.15$):

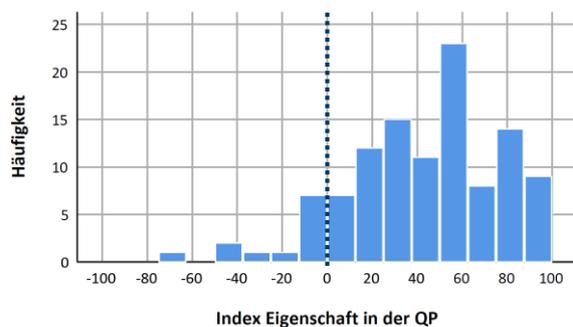


Abb. 6: Index zu Vorstellungen zum Eigenschaftsbegriff in der QP.

Dies ist ein ermutigendes Ergebnis, denn die Abkehr von einer permanenten Lokalisierungsvorstellung von Quantenobjekten erscheint als die notwendige Voraussetzung für eine überdauernde Abkehr von einer naiven Teilchenvorstellung. Aber auch hier gilt: Die Stabilität der Vorstellungen kann nur mit Interviews in der Retrospektive eingeschätzt werden; die Ergebnisse der Interviewstudie bleiben abzuwarten.

Ein ähnliches Bild, wie beim Eigenschaftsbegriff, zeigt sich auch hinsichtlich der Ergebnisse des Vorstellungsfragebogens zur Wahrscheinlichkeitsdeutung in der Quantenphysik ($m = 45.79, SD = 40.22$).

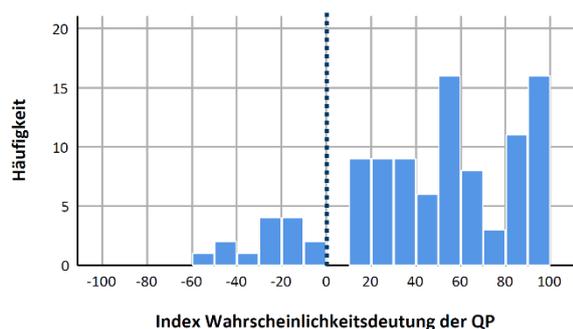


Abb. 7: Index zu Vorstellungen zur Wahrscheinlichkeitsdeutung in der QP.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die ersten Ergebnisse der summativen Evaluation sprechen dafür, dass ein (nachhaltiger) Lernzuwachs bezogen auf das Begriffswissen in der Quantenoptik mittels des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik erreicht werden kann und die Schülerinnen und Schüler zu angemessenen Vorstellungen gelangen.

Diese ersten Ergebnisse sind daher mehr als eine bloße Legitimation für eine Lehre moderner Quantenphysik an Schulen und auch mehr als ein Indiz, dass die Begriffe der modernen Quantenphysik auf dem Niveau der Sekundarstufe II vermittelt werden können: Es zeigt sich, dass mit nur geringem Zeitaufwand von vier Unterrichtsstunden sogar die Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler zur Quantenphysik und ihren Konzepten auf überzeugende Weise gefördert werden können.

Es bleibt zu prüfen, inwiefern das aufgebaute deklarative Wissen die Schülerinnen und Schüler zu konsistenten Argumentationen im neuen Begriffsfeld befähigt. Der Mehrwert der Intervention zeigt sich letztlich insbesondere durch die Triangulation der Daten von Fachwissenstest, Vorstellungsfragebogen mit den Ergebnissen der Interviewstudie.

Damit kann dann auch geklärt werden, inwiefern ein Konzeptwechsel bezüglich der Vorstellung von Photonen durch das Erlanger Konzept gelingen kann. Oder überzeugt die Vorstellungen von Photonen als kugelförmige Teilchen die Lernenden doch mehr?

6. Literatur

- [1] EU, „Quantum Flagship: Understand Quantum Technologies,“ <https://qt.eu/understand/>, aufgerufen am 03.02.2020.
- [2] G. Leuchs, „Wie viel Anschauung verträgt die Quantenmechanik,“ *Praxis der Naturwissenschaft - Physik in der Schule*, 2013.
- [3] H. Staderman, E. van den Berg und M. Goedhart, „Analysis of secondary school quantum physics curricula of 15 different countries: Different perspectives on a challenging topic,“ *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.* 15, 2019.
- [4] M. Lichtfeldt, *Schülervorstellungen in der Quantenphysik und ihre möglichen Veränderungen durch Unterricht*, Westarp Wissenschaften, 1992.
- [5] H. Kimble, M. Dagenais und L. Mandel, „Photon Antibunching in Resonance Fluorescence,“ *Phys. Rev. Lett.*, Bd. 39, pp. 691-695, 1977.
- [6] P. Grangier, G. Roger und A. Aspect, „Experimental evidence for a photon anticorrelation effect on a beam splitter: A new light on single-photon interferences,“ *Europhys. Lett.*, Bd. 1, p. 173, 1986.
- [7] J. Thor, M. Neel, V. Donato, G. Bergreen, R. Davies und M. Beck, „Observing the quantum behavior of light in an undergraduate laboratory,“ *American Journal of Physics*, pp. 1210-1219, 2004.
- [8] R. Scholz, G. Friege und K.-A. Weber, „Undergraduate quantum optics: experimental steps to quantum physics,“ *Eur. J. Phys.*, Bd. 39, Nr. 5, p. 055301, 2018.
- [9] E. Galvez, C. Holbrow, M. Pysier, J. Martin, N. Courtemanche, L. Heilig und J. Spencer, „Interference with correlated photons: Five quantum mechanics experiments for undergraduates,“ *American Journal of Physics*, Bd. 73, Nr. 2, pp. 127-140, 2005.
- [10] A. Kral, C. Theis, B. Schorn und H. Heinke, „Praxistauglicher Einstieg in die Quantenphysik mit Realexperimenten,“ *Implementation fachdidaktischer Innovation im Spiegel von Forschung und Praxis - Tagungsband zur GDGP-Jahrestagung*, 2016.
- [11] P. Bronner, A. Strunz, C. Silberhorn und J. Meyn, „Interactive screen experiments with single photons,“ *Eur. J. Phys.* (30), pp. 345-353, 2009.
- [12] J. Küblbeck und R. Müller, *Die Wesenszüge der Quantenphysik: Modelle, Bilder, Experimente*, Aulis-Verlag Deubner, 2003.
- [13] P. Bitzenbauer und J.-P. Meyn, „Quantenphysik g²-reifbar machen,“ *Plus Lucis*, Bd. 3, pp. 17-21, 2019.

- [14] R. Müller, „Die Quantenphysik im Spannungsfeld zwischen Fachlichkeit, empirischer Forschung und Schulpraxis,“ in *Authentizität und Lernen - das Fach in der Fachdidaktik. Tagungsband zur GDCP-Jahrestagung in Berlin 2015*, Regensburg, Universität Regensburg, 2016, pp. 13-24.
- [15] S. Heusler, „Einführung in das Konzept der DVD Quantendimensionen,“ <https://www.klett.de/produkt/isbn/978-3-12-772611-4>, aufgerufen am 05.02.2020.
- [16] A. Kohnle, I. Bozhinova, D. Browne, M. Everitt, P. Al Fomins, P. Kok, G. Kulaitis, M. Prokopas, D. Raine und E. Swinbank, „A new introductory quantum mechanics curriculum,“ *Eur. J. Phys.*, Bd. 35, 2014.
- [17] M. Malgieri, A. De Ambrosis und P. Onorato, „What is Light? From Optics to Quantum Physics Through the Sum over Paths Approach,“ *Conference Paper*, 2015.
- [18] H. Niedderer, Atomphysik mit anschaulichem Quantenmodell, IPN Kiel, 1992.
- [19] R. Müller, Quantenphysik in der Schule, Logos Verlag, 2003.
- [20] M. Schreier und Ö. Odag, „Mixed Methods,“ in *Handbuch Qualitative Forschung in der Psychologie*, Wiesbaden, VS Verlag für Sozialwissenschaften | Springer Fachmedien, 2010, pp. 263-277.
- [21] L. Hoffmann, P. Häußler und M. Lehrke, Die IPN-Interessensstudie Physik, Kiel: IPN, 1998.
- [22] A. Schulz, Experimentierspezifische Qualitätsmerkmale im Chemieunterricht. Eine Videostudie, Berlin: Logos Verlag, 2011.
- [23] J. Winkelmann, Auswirkungen auf den Fachwissenszuwachs und auf affektive Schülermerkmale durch Schüler- und Demonstrationsexperimente im Physikunterricht., Bd. 179, Berlin: Logos verlag, 2015.
- [24] C. Brell und H. Theyßen, „Die Smiley-Skala - Ein effizientes Messinstrument für die Interessenheit des Unterrichts,“ *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht*, Bd. 60/8, pp. 476-479, 2007.
- [25] P. Bitzenbauer und J.-P. Meyn, „Evaluation eines Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik mit Einzelphotonenexperimenten - Ergebnisse einer Pilotstudie,“ in *Naturwissenschaftliche Kompetenzen in der Gesellschaft von morgen. Tagungsband zur GDCP-Jahrestagung in Wien 2019*, Universität Duisburg-Essen, 2020.
- [26] Y. W. Cheong und J. Song, „Different levels of meaning of wave-partivle duality and a suspensive perspective on the interpretation of quantum theory,“ *Science & Education*, Bd. 23(5), pp. 1011-1030, 2013.
- [27] W. Jung, „Probing accpetance, a technique for investigating learning difficulties,“ *Research in physics learning: Theoretical issues and emprical studies*, pp. 278-295, 1992.
- [28] G.-J. Posner, K.-A. Strike, P.-W. Hewson und W.-A. Gertzog, „Accomodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change,“ *Science Education*, Bd. 66, pp. 211-227, 1982.
- [29] U. Flick, „Triangulation,“ in *Handbuch Qualitative Forschung in der Psychologie*, Wiesbaden, VS Verlag für Sozialwissenschaften | Springer Fachmedien , 2010, pp. 278-289.