

Benedikt Weiss¹
Verena Spatz¹
Markus Gräfe¹
Jens Küchenmeister²

¹ TU Darmstadt
²Thorlabs GmbH

Experiment für Schüler:innen zur Quantenbildung mit nicht-detektiertem Licht

Ausgangslage

Die Quantenphysik zählt zu den faszinierendsten und zugleich herausforderndsten Bereichen der modernen Physik und bestimmt maßgeblich unsere aktuelle wissenschaftliche Weltanschauung (Stadermann, 2019). Insbesondere die Quantenverschränkung – ein Phänomen, das Albert Einstein als „spukhafte Fernwirkung“ bezeichnete – stellt gängige Vorstellungen von Realität und Kausalität infrage und bietet tiefgehende Einblicke in die fundamentale Struktur der Natur. Während die theoretischen Grundlagen der Quantenmechanik oft als abstrakt und schwer zugänglich gelten, hat die jüngere Forschung, insbesondere durch Experimente wie die von Alain Aspect und Anton Zeilinger, gezeigt, dass diese Konzepte nicht nur für die Grundlagenforschung, sondern auch (perspektivisch) für technologische Innovationen wie der Quantenbildung, der Quantenkryptographie oder in der diagnostischen Medizin von großer Bedeutung sind (Aspect & Zeilinger, 2022; Pearce, 2023).

Angesichts der fortschreitenden Entwicklung der Quantentechnologien (LASER, PV-Anlagen, Microchips, etc.) und ihrer potenziellen Anwendungen in Bereichen wie Kommunikation, Kryptographie und Medizin ist es wichtig, dass nicht nur Schüler:innen sondern auch die Öffentlichkeit im allgemeinen mit den Grundprinzipien dieser Technologien vertraut gemacht werden (Bitzenbauer, 2021). Der Zugang zu Quantenphänomenen, wie der Superposition und der Verschränkung, ermöglicht es nicht nur, das Verständnis für die moderne Physik zu vertiefen, sondern zeigt auch auf, wie diese Phänomene praktische Anwendung in der Gesellschaft finden.

Dennoch wird in vielen Lehrplänen nach wie vor ein Schwerpunkt auf die historische Entwicklung der Quantenphysik gelegt, wobei die Energiequantisierung bei gebundenen Zuständen im Zentrum steht (Woitzik & Passon, 2023). Diese Herangehensweise geht oft mit „konzeptionellen Fallstricken“ einher und erschwert es Schüler:innen, ein intuitives Verständnis für die zentralen Konzepte der Quantenmechanik zu entwickeln (Rode, 2017). Aktuelle Ansätze in der Physikdidaktik plädieren dafür, verstärkt Phänomene wie Superposition und Verschränkung in den Fokus des Unterrichts zu rücken, da diese Konzepte eine moderne Sichtweise auf die Quantenphysik vermitteln (Woitzik & Passon, 2023) und perspektivisch eine Kontextorientierung für den Quantenphysikunterricht ermöglichen (Müller, 2023). Allerdings fehlen hierzu bisher Realexperimente, um Verschränkung erfahrbar zu machen, was im Rahmen schulischen Unterrichts aufgrund enormer Kosten und aufwändiger Justage solcher Experimente kaum verwunderlich ist. Abhilfe könnten Simulationen schaffen, wie es beispielsweise Rodriguez (2020) oder Bungum (2014) vorschlagen. Simulationen und Gedankenexperimente basieren allerdings ihrerseits auf den

theoretischen Annahmen oder Einsichten und können daher Realexperimente nicht ersetzen (Beisbart, 2015). Überzeugende Realexperimente sind somit unerlässlich, zumal insbesondere die Quantenphysik von einigen Schüler:innen als abstrakt und sogar als absurd wahrgenommen wird, was zur Folge hat, dass sie beispielsweise die statistische Sichtweise nur widerwillig akzeptieren (Henriksen, 2014).

Derzeit gibt es nur wenige außerschulische Lernorte wie das QuantumLab der Universität Erlangen-Nürnberg (oder das PhotonLab am MPQ in München), das sich der Aufgabe verschrieben hat, quantenphysikalische Grundlagen durch interaktive Bildschirmexperimente über das Internet zu vermitteln und dabei gleichzeitig das Interesse der Schüler:innen an Physik oder am Experimentieren in der Physik zu erhöhen. (Bitzenbauer, 2020). Auch wenn Bitzenbauer in seiner Erhebung keinen signifikanten Anstieg beim Interesse an Physik und am Experimentieren in der Physik zeigen konnte, finden sich dennoch Indizien, dass Schüler:innen der gymnasialen Oberstufe durchaus Interesse an moderner Quantenphysik haben (Bitzenbauer, 2020; Bungum, 2014). Des Weiteren sei der Bedarf an anderen Unterrichtskonzepten weiterhin groß, um über sinnvoll geplante Vergleiche die Konzepte für sich und auch den Quantenphysikunterricht als Ganzes weiter zu verbessern (Bitzenbauer, 2020).

In diesem Beitrag wird ein aktuelles Projekt vorgestellt, welches die derzeit überschaubaren Angebote zur Vermittlung quantenphysikalischer Grundkenntnisse über Realexperimente durch einen weiteren, innovativen Ansatz bereichern soll. Ziel ist der Nachbau des Experiments zur Quantenbildung von Zeilinger et al. (Nobelpreis für Physik 2022) im Rahmen eines Schülerlabors, das Schüler:innen Einblick in eines der spannendsten und relevantesten Forschungsfelder der Gegenwart verschafft (Aspect & Zeilinger, 2022). Neben der experimentellen Darstellung der Quantenverschränkung wird ein medizinischer Anwendungskontext aufgezeigt, der die Relevanz der Quantenbildung verdeutlicht und eine Brücke zwischen theoretischem Wissen und gesellschaftlichen Anwendungen schlägt. Neben der Vermittlung der Wesenszüge der Quantenphysik wird zusätzlich aufgrund einer intensiven Auseinandersetzung mit dem Experiment ein Zuwachs im Interesse an (Quanten-) Physik und der Wahrnehmung der Bedeutung von moderner Physik für die Gesellschaft angestrebt.

Das Experiment zur Quantenbildung mit nicht-detektiertem Licht

Das ursprüngliche Experiment zur Quantenbildung mit nicht-detektierten Photonen von Anton Zeilinger hat die Form eines geschachtelten Mach-Zehnder-Interferometers (Lemos, 2014). Kompakter und günstiger gelingt das Experiment in der Form eines geschachtelten Michelson-Interferometers mit nur einem nichtlinearen Kristall (Töpfer, 2022).

Das beobachtete Phänomen bleibt jedoch das gleiche. Es werden zwei (verschränkte) Photonenpaare, jeweils bestehend aus einem idler und einem signal Photon, erzeugt und zur Interferenz gebracht. Und obwohl nur eines der beiden idler Photonen auf das Objekt trifft und nur die signal Photonen detektiert werden, kann das Objekt (nach mehrmaliger Durchführung) als Interferenzerscheinung auf der Kamera aufgenommen werden.

Fragestellungen

Es wäre illusorisch davon auszugehen, dass Schüler:innen durch einmaligen Besuch eines Schülerlabors die Wesenszüge der Quantenphysik kennenlernen und verstehen könnten. Daher stellt sich für dieses Projekt eher die Frage, was das Experiment zur Quantenbildung als Ergänzung des Regelunterrichts leisten kann im Hinblick auf das Verständnis der Schüler:innen zu ...

- den Wesenszügen der Quantenphysik?
- Superposition und Verschränkung?

... sowie im Hinblick auf die Entwicklung von Interesse an quantenphysikalischen Inhalten und der Wahrnehmung der Bedeutung von moderner Physik für die Gesellschaft?

Darüber hinaus stellt sich auch die Frage, welchen Einfluss die zeitliche Eingliederung des Experiments zur Quantenbildung in den Regelunterricht auf die Lernkurve der Schüler:innen hat. Geht man davon aus, dass Schüler:innen wie geplant durch die Auseinandersetzung mit dem Experiment zur Quantenbildung ein erhöhtes Interesse an quantenphysikalischen Inhalten gewinnen, dann könnte ein Voranstellen des Schülerlabortags vor dem Regelunterricht die Motivation für die zu behandelnden Themen des Unterrichts erhöhen und somit den Lernerfolg positiv beeinflussen. Allerdings könnte sich dieses Vorgehen für Schüler:innen auch als tendenziell zu schwierig erweisen, da das Experiment zur Quantenbildung ohne Vorkenntnisse von Interferenzerscheinungen vermutlich nicht einfach zu begreifen ist. Weshalb es ebenfalls denkbar ist, dass ein höherer Lernzuwachs dann besteht, wenn die Schüler:innen zunächst den Regelunterricht durchlaufen und erst zum Abschluss der Lerneinheiten das Schülerlabor besuchen. Aus dieser Frage heraus ergibt sich auch das Studiendesign.

Studiendesign

Um die Forschungsfragen beantworten zu können sollen Schüler:innen der gymnasialen Oberstufe (Q3 in Hessen) in drei Studiengruppen eingeteilt und Gruppenweise miteinander verglichen werden. Die erste Gruppe wird vor dem Regelunterricht zur Quantenphysik das Schülerlabor besucht haben, die zweite Gruppe wird zunächst den Regelunterricht zur Quantenphysik durchlaufen und erst im Anschluss das Schülerlabor besuchen, wohingegen die dritte Gruppe als Vergleichsgruppe dient und das Schülerlabor überhaupt nicht besuchen wird. Erfasst werden in einer Prä-, Post- und Follow-Up-Erhebung die Effekte auf den Lernerfolg, das Interesse und die Wahrnehmung der Bedeutung moderner Physik auf die Gesellschaft, wobei jeweils zwischen dem Schülerlabortag und dem Regelunterricht für die Gruppen eins und zwei eine weitere Zwischenerhebung mittels Onlinefragebogen stattfindet.

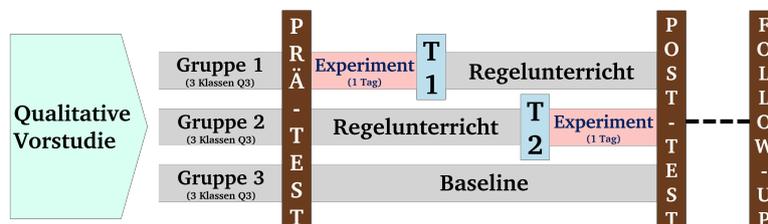


Abbildung 1: Studiendesign mit Prä-, Post-, Follow-Up-Erhebung sowie den Erhebungen bei T1 und T2.

Literatur

- Aspect, A., Clauser, J. F., & Zeilinger, A. (2022). The Nobel Prize in Physics 2022. Nobel Prize Official Website
- Beisbart, C. (2015). Wie viel Experiment braucht die Physik? Experiment, Gedankenexperiment und Computersimulation. *Physik in unserer Zeit*, 46(6), 281-287
- Bitzenbauer, P. (2020). Quantenoptik an Schulen: Studie im Mixed-Methods Design zur Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik (Volume 303). Logos Verlag Berlin.
- Bitzenbauer, P. (2021). Quantum physics education research over the last two decades: A bibliometric analysis. *Education Sciences*, 11(11), 699
- Bungum, B., Henriksen, E. K., Angell, C., Tellefsen, C. W., & Bøe, M. V. (2015). ReleQuant-Improving teaching and learning in quantum physics through educational design research
- Henriksen, E. K., Bungum, B., Angell, C., Tellefsen, C. W., Frågåt, T., & Bøe, M. V. (2014). Relativity, quantum physics and philosophy in the upper secondary curriculum: challenges, opportunities and proposed approaches. *Physics Education*, 49(6), 678
- Heusler, S., & Pusch, A. (2023). Quantenoptik mit modularen Schülerexperimenten: Low-Cost-Experimente mit dem 3-D-Drucker zu Anwendungsbeispielen von Quantentechnologien. *Unterricht Physik*, 2023(198), 21-26
- Lemos, G. B., Borish, V., Cole, G. D., Ramelow, S., Lapkiewicz, R., & Zeilinger, A. (2014). Quantum imaging with undetected photons. *Nature*, 512(7515), 409-412.
- Müller, R. (2023). Quantentechnologien unterrichten? Schulische Zugänge mit den Wesenszügen der Quantenphysik und didaktische Potenziale. *Unterricht Physik*, 2023(198), 2-7
- Pearce, E., Gemell, N. R., Flórez, J., Ding, J., Oulton, R. F., Clark, A. S., & Phillips, C. C. (2023). Practical quantum imaging with undetected photons. *Optics Continuum*, 2(11), 2386-2397
- Rode, M. (2017). Falsche Freunde. Problematische Experimente und theoretische Überlegungen zur Quantenphysik. In: *NiU Physik* 28, Nr. 162, 15-19
- Rodriguez, L. V., van der Veen, J. T., Anjewierden, A., van den Berg, E., & de Jong, T. (2020). Designing inquiry-based learning environments for quantum physics education in secondary schools. *Physics Education*, 55(6), 065026
- Stadermann, H. K. E., van den Berg, E., & Goedhart, M. J. (2019). Analysis of secondary school quantum physics curricula of 15 different countries: Different perspectives on a challenging topic. *Physical Review Physics Education Research*, 15(1), 010130
- Töpfer, S., Gilaberte Basset, M., Fuenzalida, J., Steinlechner, F., Torrez, Juan P., Gräfe, M. (2022). Quantum holography with undetected light. In: *Science Advances* 8 (2)
- Woitzik, A., Passon, O. (2023). Stolpersteine in der modernen Quantenphysik. In: *NiU Physik* 34, Nr. 198, 12-15