

## Wirkung eines Realexperiments auf quantenphysikalische Argumentation

### Hintergrund

Die Interferenz von unteilbaren Quantenobjekten, wie einzelnen Photonen stellt echtes Quantenverhalten dar. Jedoch wird mit dem Welle-Teilchen Dualismus als Erklärungsmodell eine Interpretation geliefert, die sich auf die klassischen Begriffe Welle und Teilchen stützt und spezifisch quantenphysikalischen Wesenszüge übergeht (Lautesse, Vila Valls, Ferlin, Héraud, & Chabot, 2015).

In der Schulquantenphysik regen die klassisch geprägten Begriffe Welle und Teilchen wirksam die Alternativvorstellung des naiven Welle-Teilchen Dualismus an: Quantenobjekte erscheinen als duale Hybride aus klassischen Konzepten. Die dort üblichen Erklärungen sind weitgehend qualitativ, ohne Rückgriff auf den quantentheoretischen Formalismus (Lautesse et al., 2015; Stadermann, van den Berg, & Goedhart, 2019). Widersprüche zur klassischen Physik, die dieser Formalismus aufdecken könnte, bleiben unerkannt. Um dies zu vermeiden, bedarf es eindeutiger und nicht-klassischer Erklärungen (Küblbeck & Müller, 2002; Lautesse et al., 2015; Müller, 2003).

McNeill und Krajcik (2008) folgend, sind naturwissenschaftliche Erklärungen aus drei Bestandteilen aufgebaut: *Claim* (Behauptung über ein System/Phänomen), *Evidence* (Messwerte, Sachtexte, etc.) und dem verbindenden *Reasoning*. Letzteres legitimiert die *Evidence* als angemessen und relevant zur Unterstützung der *Claims* und ist mit naturwissenschaftlichen Theorien verbunden.

Die Idee des vorliegenden Projekts ist es, Kernideen der Quantenphysik als Argumentationswerkzeuge (quantenphys. Argumentation) zu verwenden und damit eindeutige Erklärungen ohne die Konzepte Welle und Teilchen aufzubauen (Feynman, Leighton, & Sands, 2015; Küblbeck & Müller, 2002). Auch in Hinblick auf die, für den Unterricht als interessant angesehenen Kontexte Quantenkryptographie und -computing, stellen die Probabilistik, das Superpositionsprinzip sowie die Fähigkeit zur Interferenz (PSI) Kernideen der Quantenphysik dar (Pospiech, 2021; Scholz, Wessnigk, & Weber, 2020; Zeilinger, 2000). Zugänglich erscheinen diese Kernideen durch das in Abb. 1 dargestellte

Einzelphotonenexperiment. Die Kombination aus Strahlteilerexperiment und Michelsoninterferometer erlaubt die gleichzeitige Demonstration von Unteilbarkeit und Interferenz einzelner Photonen (Scholz et al., 2020). Damit erscheint das Experiment geeignet, dualistische Denkweisen in Frage zu stellen (Müller, 2003) und als

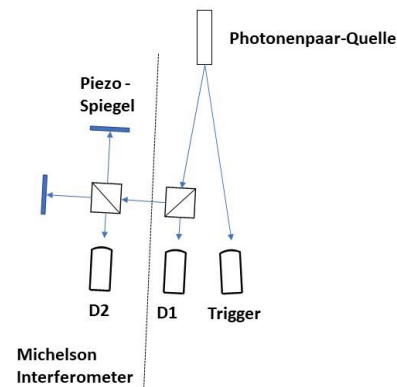


Abb. 1: Demonstration von PSI durch Kombination aus Einzelphotonen Strahlteilerexperiment und Michelson-Interferometer.

Schlüsselexperiment einen Zugang zur quantenphysikalischen Argumentation zu ermöglichen (Scholz et al., 2020).

### Forschungsziel, Design und Methode

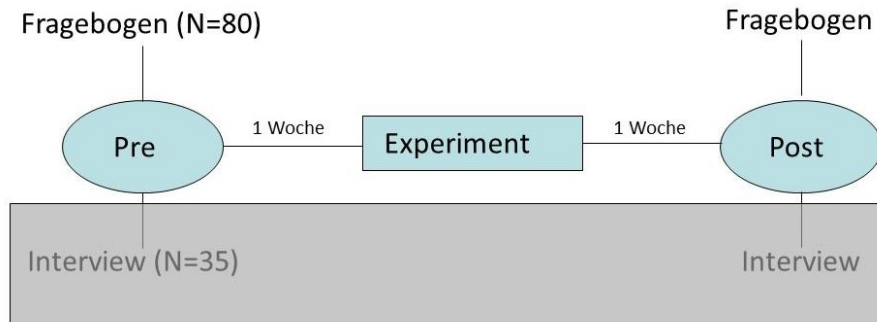


Abb. 2: Forschungsdesign

Allerdings liegt bisher keine Untersuchung zu der antizipierten Wirkung des Experiments vor. Ziel der hier vorgestellten Arbeit ist es zu untersuchen, inwieweit das Experiment zu einer Entwicklung eines Konzeptverständnisses von PSI führt und inwieweit diese Schlüsselideen für die Erklärung von Quantenphänomenen verwendet werden.

Um das Forschungsziel zu erreichen, wurde ein Mixed-Methods Ansatz im Pre-Post Design (Abb. 2) gewählt. 80 Studierende im 2. Semester Physik (deren spezifisches Fachwissen hat etwa Abiturniveau, da Quantenphysik noch nicht Teil des universitären Curriculums war) wurden mit einem Mixed-Format Test mit 29 Items (4 offene) untersucht und zusätzlich eine Subgruppe (N=35) in leitfadengestützten Interviews zur Erklärung des Experiments befragt. Der Fragebogen wurde mittels Rasch-Analyse mit dem R-Paket *eRm* ausgewertet, wobei zunächst die Modellkonformität der Items und Personen geprüft wurde.

### Ergebnisse

Basierend auf den von Boone, Staver und Yale (2014) angegebenen Werten für den MNSQ Personen bzw. Item IN- und OUTFIT, wurden Personen / Items von der Auswertung ausgeschlossen, deren MNSQ Werte größer 2.0 oder kleiner 0.5 waren. Insgesamt wurden 15 Personen (18,75%) und drei Items ausgeschlossen.

Die Ergebnisse der Rasch-Analyse von Pre und Post Test sind in den Wright-Maps in Abb. 3 dargestellt. Trotz einer auffälligen Änderung der Itemschwierigkeit von Item 2, welches den Knallertest thematisiert, zeigen sich keine signifikanten Änderungen der Schwierigkeiten, sodass die Fähigkeiten verglichen werden können.

Wie bereits in Abb.3 (oben) sichtbar, nimmt die Personenfähigkeit von Pre zu Post zu. Ein ungerichteter t-Test bestätigt die statistisch höchst-signifikante Zunahme der mittleren Personenfähigkeit ( $t = -8.2295$ ,  $df = 64$ ,  $p = 1.289e-11$ ; 95% Konfidenzintervall  $[-1.0991681, -0.6696075]$ ,  $\Delta = -0.883878$ ,  $d = 1.020301$ ).

Nachfolgend wurden Veränderungen in den jeweiligen Leistungsquartilen betrachtet. Im Vergleich von Pre und Post in Abb. 3 fällt zunächst auf, dass die Studierenden in den unteren beiden Leistungsquartilen im Post Test mehr Items beantworten konnten. Wohingegen die oberen Leistungsquartile durch die Beantwortung weniger Items charakterisiert werden.

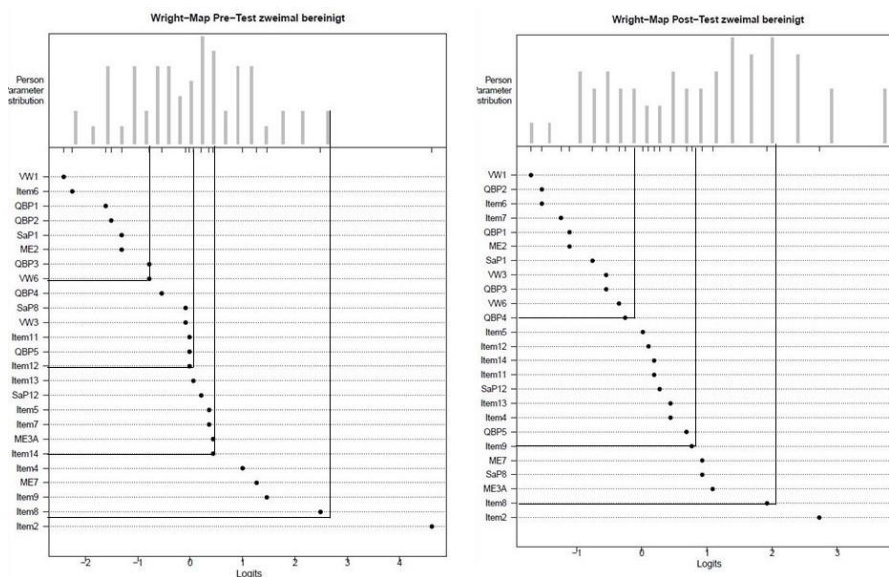


Abb. 3: Wright-Maps von Pre und Post Test. Eingezeichnet: Leistungsquartile

Der Zuwachs zeigt, dass die Studierenden im Pre-Test im 1. Quartil vor allen Dingen Schulwissen rezipieren können und im 2. Quartil hauptsächlich die Eigenschaften von Wellen sowie die Interferenz von klassischen Wellen thematisieren. Die Interferenz einzelner Quantenobjekte kann nur von Studierenden im 4. Quartil erklärt werden. Im Post-Test können von Studierenden im 1. Quartil nun grundlegende Eigenschaften von Quantenobjekten und Wellen benannt werden und die Interferenz einzelner Quantenobjekte bereits von den Studierenden im 3. Quartil. Der Knallertest (Item 2), welcher im Pre-Test keinem Leistungsquartil zugeordnet werden konnte, charakterisiert im Post-Test das 4. Quartil. Insgesamt lässt sich sagen, dass die Bearbeitung des in Abb. 1 dargestellten Kombinationsexperiments zu einer Erhöhung der Personenfähigkeit zu führen scheint. Des Weiteren scheint die Bearbeitung eine angemessene Erklärung der Interferenz einzelner Quantenobjekte zu fördern. Schwierig bleibt weiterhin das Superpositionsprinzip, dessen Interpretation als scheinbare Koexistenz aller Möglichkeiten sowie der Einfluss der Messung als eindeutige Festlegung des Messergebnisses, wie z.B. am optischen Strahlteiler sowie beim Knallertest.

### Limitation

Ein limitierender Faktor stellt der verwendete Test dar, weil in Pre und Post derselbe Test verwendet wurde, sodass Retesteffekte nicht ausgeschlossen werden können. Zudem ist der Post-Test im 4. Quartil wenig selektiv, da dieses durch ein einzelnes Item charakterisiert wird. Allerdings ermöglicht die zusätzliche Interviewstudie mit einer Subgruppe von 35 Studierenden detaillierte Analysen der physikalischen Argumentation bei der Erklärung von gleichzeitiger Unteilbarkeit und Interferenz von Einzelphotonen.

## Literatur

- Boone, W. J., Staver, J. R., & Yale, M. S. (2014). *Rasch analysis in the human sciences*. Dordrecht: Springer.
- Feynman, R. P., Leighton, R. B., & Sands, M. (2015). *Quantenmechanik*. Berlin, München, Boston: DE GRUYTER. <https://doi.org/10.1515/9783110367744>
- Küblbeck, J., & Müller, R. (2002). *Die Wesenszüge der Quantenphysik: Modelle, Bilder und Experimente. Praxis-Schriftenreihe Abteilung Physik: Vol. 60*. Köln: Aulis-Verl. Deubner.
- Lautesse, P., Vila Valls, A., Ferlin, F., Héraud, J.-L., & Chabot, H. (2015). Teaching Quantum Physics in Upper Secondary School in France. *Science & Education*, 24(7-8), 937–955. <https://doi.org/10.1007/s11191-015-9755-9>
- McNeill, K. L., & Krajcik, J. (2008). Inquiry and Scientific Explanations: Helping Students Use Evidence and Reasoning. In J. Luft, R. Bell, & J. Gess-Newsome (Hrsg.), *Science as inquiry in the secondary setting* (pp. 121–134). Arlington, VA: National Science Teachers Association Press.
- Müller, R. (2003). *Quantenphysik in der Schule. Studien zum Physiklernen: Vol. 26*. Berlin: Logos-Verl.
- Pospiech, G. (2021). *Quantencomputer & Co: Grundideen und zentrale Begriffe der Quanteninformatik verständlich erklärt* (1. Auflage 2021). *essentials*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH; Springer Spektrum. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-30445-4>
- Scholz, R., Wessnigk, S., & Weber, K. A. (2020). A classical to quantum transition via key experiments. *European Journal of Physics*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1088/1361-6404/ab8e52>
- 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). <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.15.010130>
- Zeilinger, A. (2000). Quantenexperimente zwischen Photon und Fulleren. *Physik in Unserer Zeit*, 31(5), 199–202. [https://doi.org/10.1002/1521-3943\(200009\)31:5%3C199::AID-PIUZ199%3E3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/1521-3943(200009)31:5%3C199::AID-PIUZ199%3E3.0.CO;2-U)