

## Lernzuwachs beim Einstieg in die Quantenphysik mit Realexperimenten

### Einbettung und Ziele

Das Doppelspaltexperiment „als didaktischer Alleskönner“ (vgl. Leisen, 2000) stellt für die Schule in vielfältigen Unterrichtskonzeptionen ein Schlüsselexperiment zum Einstieg in die Quantenphysik dar (vgl. Schulministerium NRW, 2014, Wiesner & Schorn, 2015). Dabei kommen Lehrtexte, Simulationen, Bilder und Videos (vgl. Müller & Wiesner, 2002) zum Einsatz, die einen qualitativen Zugang zu grundlegenden Phänomenen der Quantenphysik ermöglichen. In Aachen wurden als mediale Ergänzung ein Doppelspaltexperiment mit wenigen Photonen (vgl. Kral et al., 2017) und ein Doppelspaltexperiment mit Farbtropfchen entwickelt, die auf fachdidaktischen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten verschiedener Gruppen aufbauen (Weis & Wynands, 2003; Dimitrova & Weis, 2008; Leutner et al., 2010, Rueckner & Peidle, 2013) und gleichzeitig die Erfordernisse der Schulpraxis konsequent berücksichtigen (vgl. Kral et al., 2016).

Inwieweit das entwickelte Realexperiment Kriterien zur Schulpraxistauglichkeit (s. Abb. 1) genügt, wird im Rahmen einer empirischen Studie untersucht. Erste Ergebnisse hierzu werden im vorliegenden Beitrag exemplarisch vorgestellt, wobei die Wahrnehmung der experimentellen Ergebnisse durch die Schülerinnen und Schüler (SuS) und ihr mit einem Fachwissens-test ermittelter Lernzuwachs im Mittelpunkt stehen.



Abb. 1: Schematische Darstellung verschiedener Kriterien zur Entwicklung von Realexperimenten für den praxistauglichen Einsatz in Schulen aus drei Perspektiven

### Kriterien zur Entwicklung praxistauglicher Realexperimente für die Schule

Ziel ist es die Praxistauglichkeit des entwickelten Realexperiments beim Einsatz in der Schule zu beurteilen. Dazu wird das Experiment aus drei verschiedenen Perspektiven untersucht (vgl. Abb. 1). Neben einer Betrachtung der im Realexperiment aufgenommenen Messergebnisse

wird eine Studie mit Lehrkräften sowie mit Schülerinnen und Schülern durchgeführt. Mit einem umfangreichen Studiendesign werden vielfältige Aspekte der Praxistauglichkeit genauer in den Blick genommen. Exemplarisch werden im Folgenden erste Ergebnisse zum Beobachtungsprozess der SuS vorgestellt, der maßgeblich für den erreichbaren, mittels Fragebogen überprüften Lernzuwachs ist.

### Stochastische Vorhersagbarkeit mit dem entwickelten Realexperiment

Das Experiment ist grundsätzlich in der Lage den Prozess der Entwicklung des Messergebnisses von einzelnen Ereignissen, deren lokales Erscheinen dem Zufall unterliegt, bis zur statistischen Vorhersage des Beugungsbildes (vgl. Müller, 2016) zu visualisieren. Der erste Einsatz im Unterricht zeigte bisher, dass SuS dem detektierten Licht in den ersten Sekunden der Durchführung des Experiments ein zufälliges und unstrukturiertes Verhalten zuordnen, bei dem sich Einzelereignisse nicht vorhersagen lassen. Erst nach einer gewissen Zeit bildet sich aus vielen Einzelereignissen eine systematische Verteilung heraus, die es ermöglicht, stochastische Aussagen über Einzelereignisse vorzunehmen (vgl. Abb. 2). Im Folgenden wird der Beobachtungsprozess der SuS genauer untersucht, da dieser maßgeblich den mit dem Experiment erreichbaren Lernzuwachs mitbestimmt. Es wird betrachtet, inwieweit SuS die in Abb. 2 dargestellten Interferenzbilder in verschiedenen Entwicklungsstadien ihrer Ausprägung als solche wahrnehmen. Dazu wählten sie bei der Durchführung des Realexperiments jeweils nach einer bestimmten Zeit die Verteilung aus, die am ehesten ihrer Beobachtung des aktuellen Messergebnisses entsprach. Erste Resultate für  $N = 43$  SuS führten zu der Erkenntnis, dass die SuS nach 10 Sekunden Dauer einer Messung i.d.R. noch nicht in der Lage waren die beobachtete Flächenverteilung der Einzelereignisse einem Interferenzmuster zuzuordnen.

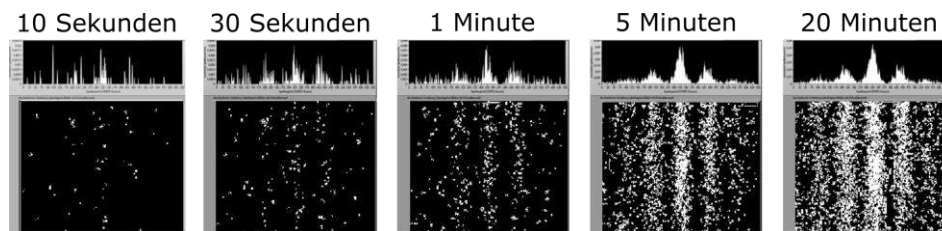


Abb. 2: Beispielmessung für die Entwicklung eines Interferenzbildes des Experiments PHODE am Doppelspalt nach verschiedenen Messdauern

Doch wie lange dauert es im Beobachtungsprozess, bis ein Doppelspalt-Interferenzbild von den beobachtenden SuS wahrgenommen wird? Nach einer Messdauer von einer halben Minute entscheiden sich ca. die Hälfte der Studienteilnehmer für eine Verteilung, die einem Interferenzbild entspricht. Nach einer Minute sind es bereits 97%. Damit zeigte sich, dass das entwickelte Experiment Schülerinnen und Schülern sowohl das statistische Verhalten für Einzelereignisse als auch die resultierende Verteilung des Beugungsbildes erfolgreich darbieten kann, wobei letzteres nach nur wenigen Minuten und damit praxistauglich für den Einsatz im Unterricht gelingt. Dabei muss einschränkend erwähnt werden, dass einzelne SuS beim späteren Zeichnen eines Interferenzmusters Beugungsminima mit einem Intensitätsoffset gezeichnet haben. Folglich werden solche Minima nicht immer als Bereiche erkannt, in denen nahezu kein Licht detektiert wird.

### Lernzuwachs

Das Realexperiment wurde in einer Unterrichtseinheit zum Einstieg in die Quantenphysik in vier Schulen durchgeführt, in der Phänomene aus der Quantenphysik den entsprechenden Ergebnissen der klassischen, deterministischen Mechanik gegenübergestellt wurden. Zur Erhe-

bung des Fachwissens der SuS zur klassischen Physik und zur Quantenphysik wurde ein Fragebogen vor und nach der Intervention mit jeweils acht Items eingesetzt, wobei die verwendeten Items auf früheren Forschungsarbeiten basieren und eine quantitative Bewertung des Fachwissens erlauben (vgl. Müller, 2003; Schorn, 2015). Bei einer Betrachtung der von den Probanden erzielten Gesamtpunkte für die beiden Testteile zeigt ein Mittelwertvergleich der Pre-Post-Ergebnisse einen statistisch signifikanten Unterschied der Lösungswahrscheinlichkeiten sowohl für die Items zur klassischen Physik ( $t = -4.940$ ,  $p = .000$ ,  $N = 71$ ) als auch für die Items zur Quantenphysik ( $t = -8.845$ ,  $p = .001$ ,  $N = 71$ ). Somit schneiden die SuS nach der Intervention zu beiden Inhaltsbereichen statistisch signifikant besser ab als vor der Intervention. Die Effektstärke nach Cohen (vgl. Cohen, 1988) entspricht einem starken Effekt im Bereich der klassischen Physik ( $r = -.59$ ), als auch im Bereich der Quantenphysik ( $r = -1.05$ ).

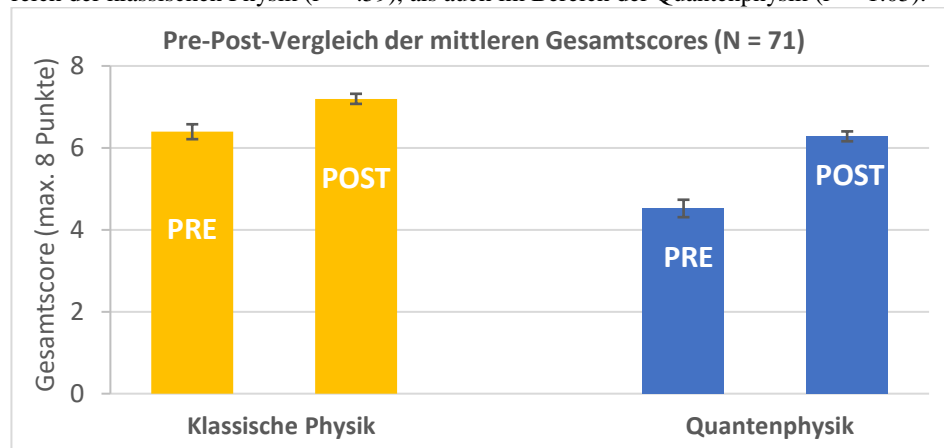


Abb. 3: Vergleich der Mittelwerte der Gesamtscores in einem Pre- und Post-Fachwissenstest für Inhalte aus der klassischen Physik und aus der Quantenphysik (t-Test)

Diese ersten Ergebnisse sind allerdings noch mit Bedacht zu interpretieren, da nicht-kognitive Faktoren wie das Interesse, die Motivation und das Selbstkonzept bisher ebenso unberücksichtigt geblieben sind, wie der Einfluss des Vorwissens in den hier untersuchten äußerst heterogenen Lerngruppen. Zudem wurde bei dieser ersten Erprobung zur Pilotierung des Testinstrumentes auf einen Follow-up-Test verzichtet.

### Fazit und Ausblick

In einer empirischen Studie wurde die Wirksamkeit eines entwickelten Realexperiments zum Einstieg in die Quantenphysik beim Einsatz in der Schulpraxis untersucht. Erste Ergebnisse weisen darauf hin, dass die SuS die stochastische Vorhersagbarkeit quantenmechanischer Phänomene in dem Experiment wahrnehmen, wobei die hierfür notwendigen kurzen Messdauern schulpraxistauglich erscheinen. In einer weiteren Studie soll nun mit einer größeren Stichprobe untersucht werden, ob sich diese ersten Ergebnisse bestätigen lassen. Dabei wird auch analysiert, ob die Wahrnehmung der experimentellen Ergebnisse vom Vorwissen der Beobachtenden abhängt, wozu standardisierte Videos der zeitlichen Entwicklung der Intensitätsverteilung am Flächendetektor zum Einsatz kommen.

Beim Einsatz der Unterrichtseinheit zeigte sich ein signifikanter Zuwachs der Mittelwerte der Gesamtscores eines Fachwissenstests in den beiden Inhaltsbereichen der klassischen Physik und der Quantenphysik (t-Test), worauf auf einen Lernzuwachs der Probanden in diesen beiden Inhaltsbereichen geschlossen wurde. Im Rahmen einer weiterführenden Studie werden Korrelationen des Lernzuwachses zu nicht-kognitiven Faktoren und eine vermutete Abhängigkeit vom Vorwissen genauer untersucht.

## Literatur

- J. Cohen: Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences. 2. Auflage. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale 1988, S. 79-80.
- Dimitrova, T. L. & Weis, A. (2008): The wave-particle duality of light: A demonstration experiment. *Am. J. Phys.* 76, 137.
- Kral, A. & Theis, C. & Heinke, H. (2016): Der Photonendetektor für die Schule als Einstieg in die Quantenphysik. Didaktik der Physik Frühjahrstagung Hannover.  
online unter <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/722/851> (Stand 10/2018)
- Kral, A. & Theis, C. & Schorn, B. & Heinke, H. (2017). Praxistauglicher Einstieg in die Quantenphysik mit Realexperimenten. In: C. Maurer (Hrsg.), Implementation fachdidaktischer Innovation im Spiegel von Forschung und Praxis. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Zürich 2016. (S. 400). Universität Regensburg;  
online unter [http://www.gdcp.de/images/tb2017/TB2017\\_400\\_Kral.pdf](http://www.gdcp.de/images/tb2017/TB2017_400_Kral.pdf) (Stand 10/2018).
- Leisen, J. (2000): Quantenphysik Mikroobjekte - Handreichung zum neuen Lehrplan Physik in der S II. In PZ-Information 2/2000.
- Leutner, S., Scholz, R., Friege, G. (2010): Einsatz eines Mach-Zehnder-Interferometers mit abgeschwächter Lichtquelle für einen experimentellen Einstieg in die Quantenmechanik. Didaktik der Physik Frühjahrstagung. Hannover.
- Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen (2014): Kernlehrplan für die Sekundarstufe II Gymnasium / Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen. Physik. Online verfügbar unter [https://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/lehrplan/160/KLP\\_GOSt\\_Physik.pdf](https://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/lehrplan/160/KLP_GOSt_Physik.pdf) (Stand 10/2018).
- Müller, R. & Wiesner, H. (2002). Teaching quantum mechanics on an introductory level. *Am. J. Phys.* 70 (3), 200–209.
- Müller, R. (2003): Quantenphysik in der Schule. Berlin: Logos.
- Rueckner, W. & Peidle, J. (2013): A lecture demonstration of single photon interference. *Am. J. Phys* 81(12), 951-958.
- Schorn, B. (2014): Quantenphysik in der Schule. Eine Unterrichtskonzeption zur Einführung in die Quantenphysik für die 10. Jahrgangsstufe. Dissertation Technische Universität Dresden.
- Weis, A. & Wynands, R. (2003): Three demonstration experiments on the wave and particle nature of light. Physik und Didaktik in Schule und Hochschule. *PhyDid* 1/2. S.67-73.
- Wiesner, H. & Schorn, B. (2015): Das Münchener Internetprojekt - zur Lehrerfortbildung (milq) in der 10. Jahrgangsstufe. In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 4/64, S. 22-29.