

Johannes Schlaf¹
Dominik Dorsel¹
Sebastian Staacks¹
Christoph Stampfer¹
Heidrun Heinke¹

¹RWTH Aachen University

Quantenphysik mit phyphox – Entwicklung von DIY-Schülerexperimenten

Hintergrund und Zielsetzung

Smartphones verfügen über eine Vielzahl interner Sensoren wie z.B. Beschleunigungssensoren und Magnetometer. Mit geeigneten Apps wie z.B. phyphox können durch das Auslesen dieser Sensoren Messdaten aufgenommen werden (Staacks et al., 2018a) (Staacks et al., 2018b) (Dorsel, 2023, S. 7-8). Da etwa 96 % aller 12-19-Jährigen Smartphones besitzen (Medienpädagogischer Forschungsverband Südwest, 2024, S. 7), eignen sich diese Geräte in besonderer Weise für den niederschweligen Einsatz beim Experimentieren im Naturwissenschaftsunterricht. Weil das Smartphone hierbei als Messgerät fungiert, lassen sich entsprechende Schülerexperimente kostengünstig gestalten. Phyphox wird an der RWTH Aachen entwickelt und bietet neben dem Auslesen der internen Sensoren auch die Möglichkeit der Integration externer Sensormodule über Bluetooth Low Energy (BLE). Auch für die Quantenphysik bergen Smartphone-Experimente ein hohes Potential.

Hier existieren vergleichsweise wenige Realexperimente und typische im Kernlehrplan geforderte Experimente wie die Bestimmung des Planck'schen Wirkungsquantums mit der Gegenfeldmethode (Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalen, S. 50) sind weder niederschwellig einsetzbar noch kostengünstig. Das Ziel der vorgestellten Arbeiten ist es daher, die Palette der verfügbaren Quantenphysik-Experimente durch Schülerexperimente unter Nutzung von Smartphones als Messinstrument zu erweitern. Als Datenschnittstelle wird phyphox verwendet, sodass auch externe Sensormodule mit eingebunden werden können. Im Folgenden wird die Entwicklung von zwei Experimenten vorgestellt.

Experiment 1: Messung des Planck'schen Wirkungsquantums

In dem Experiment werden Schwellenspannungen verschiedener LEDs gemessen, aus welchen die Photonenenergien berechnet werden. Durch Auftragung der Photonenenergien über der zugehörigen Lichtfrequenz kann das Planck'sche Wirkungsquantum als Steigung der Ausgleichsgerade bestimmt werden. Für die Messung der Schwellenspannung wurde ein als DIY-Projekt ausgelegter Aufbau entwickelt (siehe Abb. 1). Der Aufbau besteht (i) aus einer Abdunklungsbox mit austauschbaren, mit verschiedenen LEDs bestückten Einsätzen, (ii) einem über BLE mit phyphox koppelbaren externen Modul, welches eine manuell variierbare Spannung an die jeweilige LED anlegt und den momentanen Spannungswert an phyphox schickt, (iii) einem Smartphone mit installierter phyphox-App sowie (iv) einer Stabilisierungshilfe für die Platzierung des Smartphones im Aufbau. Die benötigten Gehäuse sind als 3D-Druck ausgeführt. Zur Messung der Lichtintensität wird die Kamera des Smartphones verwendet. Mithilfe des Aufbaus wird eine Kennlinie wie in Abb. 1 aufgenommen und die Schwellenspannung als Abszissenabschnitt einer Ausgleichsgerade bestimmt. Weitere Details finden sich bei Schlaf et al., 2025.

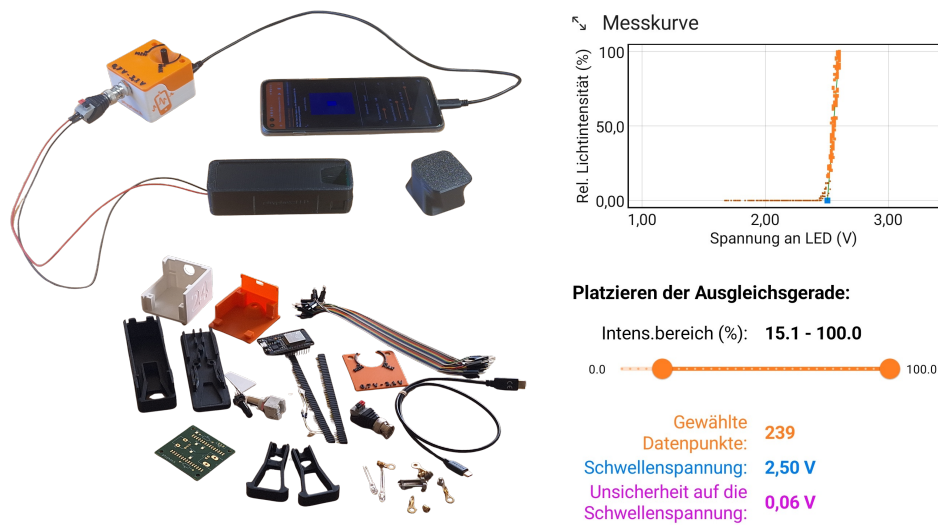
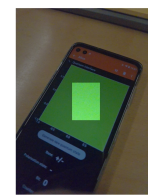


Abb. 1: Aufbau und Beispielmessung zum Versuch zur Messung des Planck'schen Wirkungsquantums. Links oben: Aufbau zur Messung von Schwellenspannungen von LEDs. Links unten: Bausatz für den Aufbau. Rechts: Screenshot einer Beispielmessung.

Experiment 2: Analogieexperiment zum BB84-Protokoll

Das BB84-Protokoll ist ein quantenkryptographisches Verfahren zur Erstellung und zum Austausch von Schlüsseln. Ein Sender (typischerweise namens Alice) schickt eine zufällige Abfolge an Polarisationszuständen über ein Signal aus Einzelphotonen an den Empfänger (typischerweise namens Bob). Der Empfänger misst die Polarisationszustände, bekommt als Ergebnis aber nur dann den gesendeten Zustand, wenn er zufällig die richtige Messbasis gewählt hat (Reddy et al., 2023). Aus diesem Umstand ergibt sich die Sicherheit des Verfahrens. In der Lehre werden aufgrund der hohen Kosten und der aufwändigen Kalibration von Einzelphotonenquellen zumeist Analogieexperimente zum BB84-Protokoll eingesetzt (siehe auch Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Stand 10/2025). In dem hier beschriebenen Experiment werden die Polarisationszustände durch Farben symbolisiert. Die unterschiedlichen Rollen (Alice, Bob) werden durch die Wahl des entsprechenden Experiments in der phyphox-App eingenommen. Im Alice-Experiment wird ein zufälliger Polarisationszustand gewählt und als farbiges Quadrat ausgegeben. Bob kann nun mit der Smartphone-Kamera diese Farbe einlesen (siehe Abb. 2). Anschließend wird im Bob-Experiment der über die Farbe eingelesene Polarisationszustand „gemessen“. Zusätzlich kann über ein weiteres phyphox-Experiment namens Eve (vom englischen „eavesdropping“) die Rolle eines Angreifers angenommen und ein Abhörversuch zwischen Alice und Bob simuliert werden. Weitere Details finden sich bei Schlaf et al., 2025. In einer weiterentwickelten Version wurde das Experiment zusätzlich für Fortgeschrittene mit verdeckten bzw. nicht offen sichtbaren Polarisationszuständen bereitgestellt, um die Analogie physikalisch korrekt(er) zu gestalten.



Quantenzustand messen

Messbasis: +/-

Gemessener Zustand: -

Bit: 0

Zähler: 2

Abb. 2: Screenshot einer Beispielmessung im Bob-Experiment.

Untersuchung der Usability

Nach der Fertigstellung erster Prototypen wurde ab dem WS 2024/25 die Usability als wichtiges didaktisches Gestaltungskriterium (siehe auch Pusch & Haverkamp, 2022, S. 23) der oben genannten Experimente evaluiert. Dabei wurde das Format des Usability Testings gewählt, bei welchem die Experimente in Feedbackschleifen wiederholt durchgeführt, bewertet und anhand des Feedbacks optimiert werden (Kaminski, 2020). Die Testung fand zum einen im Rahmen eines Versuchs in verschiedenen physikalischen Nebenfachpraktika an der RWTH Aachen statt (N=57). Zum anderen wurden die Experimente auch in Schülerveranstaltungen (N=39) und Lehrkräftefortbildungen (N=75) evaluiert. Bis jetzt wurde hauptsächlich die Usability hinsichtlich des Setups und der Durchführung inklusive der entsprechenden Anleitungen evaluiert. Die Fertigung des DIY-Aufbaus zur Bestimmung des Planck'schen Wirkungsquantums wurde aufgrund des hohen Zeitaufwands nur in einigen Schülerworkshops und Lehrkräfteworkshops (siehe nächster Abschnitt) mit insgesamt N=19 Teilnehmenden untersucht.

Lehrkräfteworkshops

Um gezielt Meinungen von Lehrkräften zu den entwickelten Experimenten einzuholen und hierbei Möglichkeiten und Voraussetzungen für deren Einsatz sowie die Fertigung des DIY-Aufbaus auszuloten, werden seit Mai 2025 zweitägige Lehrkräfteworkshops durchgeführt, die jeweils mit einem Gruppeninterview abschließen. Bisher wurden zwei Workshops (N=9) abgehalten. Erste Ergebnisse der Interviews attestieren den Experimenten zahlreiche Einsatzmöglichkeiten im Unterricht, wie z.B. die Einführung in wichtige Konzepte der Physik (Energiequantelung bzw. Quantenzustände). Die Fertigung des Aufbaus erscheint aufgrund der wachsenden Verbreitung von 3D-Druckern größtenteils unproblematisch, soll allerdings nach Einschätzung der Lehrkräfte aus Zeit- und Sicherheitsgründen überwiegend nicht durch Schüler:innen sondern im Kollegium erfolgen. Für die Anleitungen wurden ein möglichst hoher Detailgrad, eine Videoanleitung sowie eine vorgefertigte Gefahrenbeurteilung gewünscht.

Ausblick

Zu den bereits entwickelten Experimenten werden ausgehend von den Ergebnissen der ersten Interviews die Anleitungen überarbeitet. Anschließend werden weitere Interviews mit Lehrkräften zu Einsatz, Fertigung und Verbreitung der Experimente geführt. Die Interviewergebnisse sollen in die Erstellung eines geschlossenen Fragebogens einfließen, der in einer größeren Stichprobe eingesetzt werden soll. Parallel dazu wird ein neu entwickeltes Schülerworkshopformat zur Bestimmung des Planck'schen Wirkungsquantums getestet, über welches ebenfalls eine Verbreitung der Experimente an Schulen stattfinden soll.

Für das Analogieexperiment zum BB84-Protokoll ist eine über die phyphox-App ansteuerbare Web-Anwendung geplant, über die im Experiment erstellte Schlüssel zu der Verschlüsselung eines Wortes verwendet werden können. Die Erstellung der Schlüssel findet weiterhin über das Farbsignal als Quantenkanalanalogie statt.

Aktuell wird ein weiteres Experiment zur Untersuchung der quantisierten Leitfähigkeit in eindimensionalen Nanodrähten an Kontaktstellen zweier Metalldrähte entwickelt, bei dem die sogenannte phyphox-E-Box als Sensormodul verwendet werden soll (siehe auch Dorsel, 2022, S. 76-78). Zurzeit finden Optimierungen am Grundaufbau des Experiments statt, um die notwendige zeitliche Auflösung bei der Datenerhebung zu senken und dabei auch die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse zu verbessern.

Literatur

- Dorsel, D. (2023). *Entwicklung der Nutzbarkeit externer Sensoren bei Smartphone-Experimenten und deren Einsatz in naturwissenschaftlichen Experimenten* (Diss.). RWTH Aachen University. Verfügbar unter: <https://www.institut-1a.physik.rwth-aachen.de/go/id/huji/lidx/1/file/964136>.
- Kaminski, J. (2020). Theory applied to informatics – Usability. *Canadian Journal of Nursing Informatics* 15(14).
- Medienpädagogischer Forschungsverbund Südwest (2024). JIM-Studie 2024. Jugend, Information, Medien. Basisuntersuchung zum Medienumgang 12-19-Jähriger. Verfügbar unter: <https://www.mpfs.de/studien/jim-studie/2024/>.
- Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalen (2022). Kernlehrplan für die Sekundarstufe II Gymnasium / Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen.
- Pusch, A. & Haverkamp, N. (2022). *3D-Druck für die Schule und Hochschule. Konstruktion von naturwissenschaftlichem Experimentiermaterial mit Best-Practice-Beispielen*. Springer Spektrum Heidelberg.
- Schlaf, J., Dorsel, D., Staacks, S., Stampfer, C. & Heinke, H. (2025). Smartphone-gestützte Experimente zur Quantenphysik. DPG-Frühjahrstagung, Göttingen.
- Staacks, S., Heinke, H. & Stampfer, C. (2018a). Smarte Experimente. *Physik Journal* 17(11).
- Staacks, S., Hütz, S., Heinke, H. & Stampfer, C. (2018b). Advanced tools for smartphone-based experiments: phyphox. *Physics Education* 53(4). Verfügbar unter: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6552/aac05e>.
- Westfälische Wilhelms-Universität Münster (Stand 10/2025). O3Q. BB84-Protokoll. URL: <https://o3q.de/bb84/>.