

Smartphone-gestützte Experimente zur Quantenphysik

Hintergrund

Smartphones sind mit einer Vielzahl interner Sensoren ausgestattet, darunter Beschleunigungssensoren, Gyroskope und Magnetometer. Diese Sensoren können durch spezialisierte Apps wie z.B. phyphox ausgelesen werden, um Messdaten aufzunehmen (Staacks et al., 2018a) (Staacks et al, 2018b) (Dorsel, 2023, S. 7-8). In Verbindung mit ihrer kompakten Größe können Smartphones daher auf vielfältige und häufig sehr einfache Art und Weise zum Experimentieren genutzt werden. Beispiele hierfür sind die Messung der Zentripetalbeschleunigung in einer Salatschleuder und die Simulation eines Sonars durch gleichzeitige Verwendung von Lautsprecher und Mikrophon (Phyphox, Stand 10/2024a). Ein entscheidender Vorteil von Smartphones für den Einsatz im Bildungsbereich ist zudem ihre weite Verbreitung: Etwa 96% aller Jugendlichen zwischen 12 und 19 Jahren besitzen ein solches Gerät (Medienpädagogischer Forschungsverband Südwest, 2023, S. 7).

Die an der RWTH Aachen entwickelte App phyphox bietet nicht nur die Möglichkeit, interne Sensoren auszulesen, sondern erlaubt auch die Integration externer Sensormodule über Bluetooth Low Energy (BLE). Ein wenig Programmiererfahrung vorausgesetzt ermöglicht es die Arduino-Bibliothek phyphoxBLE zudem, eigene, auf den jeweiligen Einsatzzweck maßgeschneiderte Sensormodule zu kreieren, wodurch diese auch als DIY-Projekte (DIY = do it yourself) realisierbar sind (Phyphox, Stand 10/2024b).

Motivation und Zielsetzung

Es existiert ein Mangel an Realexperimenten zur Quantenphysik an Schulen, was zu einer gehäuften Nutzung von Simulationen führt (Breuer et al., 2022, S. 8). Im Vergleich zu Realexperimenten sorgt der Einsatz von Simulationen allerdings für ein niedrigeres Schülerinteresse (Herbst et al., 2016, S. 4). Auch der Kernlehrplan des Landes Nordrhein-Westfalen gibt Realexperimenten den Vorzug gegenüber anderen Methoden (Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalen, 2022, S. 12). Zusätzlich zu dem angesprochenen Mangel erfordern typische, auch im Kernlehrplan genannte Experimente wie der Photoeffekt in der Regel komplexe und kostenintensive Aufbauten, was sie häufig auf den Einsatz als Demonstrationsexperimente beschränkt. Kontrastierend hierzu nennt der Kernlehrplan allerdings das eigenhändige Durchführen von Experimenten als Bestandteil der zu erwerbenden Sachkompetenz (Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalen, 2022, S. 15). Zusammenfassend besteht ein Bedarf an geeigneten Schülerexperimenten zur Quantenphysik.

Das Ziel dieses Projekts ist es, die Sammlung der Quantenphysik-Experimente durch niederschwellig einsetzbare Schülerexperimente mit übersichtlichen, leicht verständlichen und kostengünstigen Aufbauten zu erweitern, welche sich einfach in Unterricht integrieren lassen. Um dies zu erreichen, wird das Smartphone als breit verfügbares Messinstrument

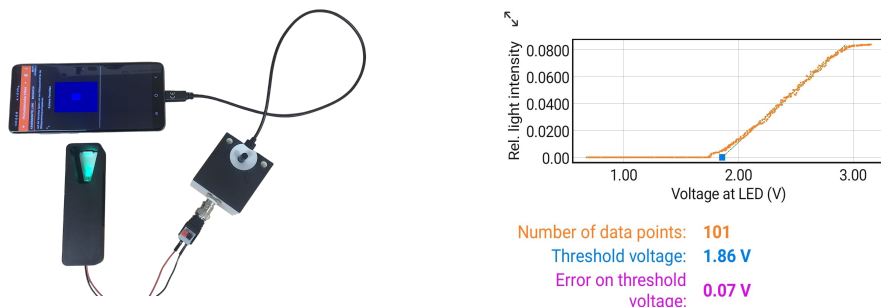


Abb. 1: Aufbau und zu erwartende Messkurve beim Versuch zur Messung des Planck'schen Wirkungsquantums. Links: Aufbau zur Messung von Schwellenspannungen von LEDs. Rechts: Screenshot einer exemplarischen Messkurve.

genutzt. Als Datenschnittstelle kommt die App phyphox zum Einsatz, was die Einbindung externer Module ermöglicht.

Bisher wurden zwei Schülerexperimente entwickelt, welche im Folgenden vorgestellt werden. Sie werden ab dem Wintersemester 2024/25 in einem Studierendenpraktikum und ab Anfang 2025 in monatlich an der RWTH Aachen angebotenen Workshops hinsichtlich ihrer Usability evaluiert.

Experiment 1: Messung des Planck'schen Wirkungsquantums

In diesem Experiment wird das Planck'sche Wirkungsquantum als Steigung in einer Auftragung von Photonenenergien verschiedener LEDs über der zugehörigen Lichtfrequenz bestimmt. Die jeweilige Photonenenergie wird aus der Schwellenspannung der entsprechenden LED berechnet, welche in einem hierzu konzipierten Aufbau gemessen wird. Der Aufbau (siehe Abb. 1) besteht aus einem Smartphone mit der phyphox-App, einem mit phyphox über BLE koppelbaren externen Modul, welches eine variable Spannung ausgibt und den momentanen Spannungswert an phyphox sendet, sowie einer 3D-gedruckten Verdunklungsbox mit austauschbaren, mit verschiedenen LEDs bestückten Einsätzen. Als externes Modul kann wahlweise die phyphox-E-Box oder die phyphox-h-Box verwendet werden (siehe Abb. 2). Erstere wurde als Sensormodul für den Einsatz in der E-Lehre entwickelt mit vielfältigen Funktionen (Spannungsversorgung, Spannungs- und Strommessung). Im Gegensatz dazu beschränkt sich die Funktionalität der phyphox-h-Box auf die Ausgabe einer manuell einstellbaren Spannung. Zudem ist diese Box auf einen Einsatz als DIY-Projekt ausgelegt. Zur Messung der Lichtintensität wird die Kamera des verwendeten Smartphones verwendet. Mithilfe des Aufbaus wird eine Kennlinie wie in Abb. 1 aufgenommen und die Schwellenspannung als Abszissenabschnitt einer Ausgleichsgerade bestimmt.



Abb. 2: Verwendete Sensorboxen. Links: phyphox-E-Box. Mitte: phyphox-h-Box. Rechts: phyphox-h-box als Bausatz.

Experiment 2: Analogie zum BB84-Protokoll

Das BB84-Protokoll ist ein Verfahren zum quantenkryptographischen Austausch von Schlüsseln. Es nutzt Einzelphotonen mit insgesamt vier verschiedenen Polarisationszuständen. Ein Sender (typischerweise mit dem Namen Alice) schickt eine zufällige Abfolge von Polarisationszuständen an den

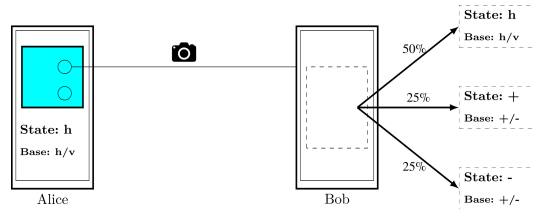


Abb. 3: Nutzungsschema des Analogieexperiments zum BB84-Protokoll.

Empfänger (typischerweise mit dem Namen Bob) (Reddy et al., 2023). Aufgrund der hohen Kosten und der diffizilen Handhabbarkeit einer Einzelphotonenquelle werden üblicherweise Analogieexperimente für das BB84-Protokoll verwendet (siehe z.B. auch Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Stand 10/2024). In dem hier beschriebenen Aufbau werden die Polarisationszustände durch Farben symbolisiert. Die unterschiedlichen Rollen (Sender = Alice, Empfänger = Bob) werden durch die Wahl designierter Experimente in der phyphox-App zugeteilt. Der Ablauf des Experiments ist wie folgt (siehe auch Abb. 3): Im Alice-Experiment wird automatisch ein zufälliger Polarisationszustand gewählt. Die Wahl erfolgt hierbei über aus dem Rauschen des Beschleunigungssensors generierte Zufallszahlen. Die dem Polarisationszustand zugeordnete Farbe wird im Display angezeigt. Nun kann Bob diese Farbe mit der Kamera seines Smartphones einlesen. Anschließend „misst“ das Bob-Experiment den zugehörigen Polarisationszustand über eine zufällige Messbasis. Diese Abfolge wird für mehrere Polarisationszustände wiederholt. Alternativ kann auf einem dritten Smartphone ein zusätzliches phyphox-Experiment namens Eve (abgeleitet vom englischen „eavesdropping“) zwischen Alice und Bob geschaltet werden und so ein Abhörversuch simuliert werden.

Ausblick

Aktuell befindet sich ein weiteres Experiment in Entwicklung, in dem die quantisierte Leitfähigkeit von Nanodrähten untersucht wird. Beim Lösen des Kontaktes zweier Metalldrähte bilden sich an der Kontaktstelle für einige Mikrosekunden näherungsweise eindimensionale Nanokontakte zwischen den Drähten aus. Diese Nanokontakte weisen eine quantisierte Leitfähigkeit auf, sodass der auf einem Oszilloskop betrachtete Spannungsverlauf während der Kontaktlösung diskrete Stufen aufweist (Pascual et al., 1995). Da diese Stufen typischerweise etwa eine Mikrosekunde lang sind, muss ein den Spannungsverlauf aufnehmendes Messinstrument über eine Datenrate von mehreren Megasamples pro Sekunde verfügen, um eine ausreichende Auflösung zu gewährleisten. Diesbezüglich wird aktuell die phyphox-E-Box optimiert. Zudem finden Optimierungen am Versuchsaufbau zur Erhöhung der Länge der beobachtbaren Stufen und der Verbesserung der Reproduzierbarkeit statt.

Ab dem Jahresanfang 2025 werden monatliche Schülerworkshops für SuS in der Qualifikationsphase an der RWTH Aachen durchgeführt, in denen die Usability der Aufbauten evaluiert wird. Der monatliche Turnus wird ergänzt durch ferienspezifische Sondertermine, welche sich auch an SuS der Sekundarstufe I richten. Zudem wird pro Quartal ein Lehrkräfteworkshop angeboten, in dem die verschiedenen Experimente von Lehrkräften durchgeführt und kooperativ Einsatzszenarien für den Schulunterricht entwickelt werden können.

Literatur

- Breuer, J., Vogelsang, C., Reinhold, P. (2022). Nutzungsverhalten von Lehrkräften bei der Implementierung einer physikdidaktisch innovativen Unterrichtskonzeption. Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften, 28(1).
- 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>.
- Herbst, M., Fürtbauer, E.-M., Strahl, A. (2016). Interesse an Physik. DPG-Frühjahrstagung, Hannover.
- Medienpädagogischer Forschungsverbund Südwest (2023). JIM-Studie 2023: Jugend, Information, Medien. Verfügbar unter: <https://www.mpfs.de/studien/jim-studie/2023/>.
- Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalen (2022). Kernlehrplan für die Sekundarstufe II Gymnasium / Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen.
- Pascual, J. I., Méndez, J., Gómez-Herrero, J., Baró, A. M., Garcia, N., Landman, U., Luedtke, W. D., Bogachek, E. N., Cheng, H.-P. (1995). Properties of Metallic Nanowires: From Conductance Quantization to Localization. In: Science, 267(5205), 1793-1795.
- Phyphox (Stand 10/2024a). Experimente. URL: <https://phyphox.org/de/experimente>.
- Phyphox (Stand 10/2024b). Bluetooth Low Energy. URL: <https://phyphox.org/de/ble-de/>.
- Pili, U. & Violanda, R. (2019). Smartphone-based measurement of the Planck's constant with light emitting diodes. In: Physics Education, 54(2) 023007.
- Reddy, S., Mandal, S., Mohan, C. (2023). Comprehensive Study of BB84. A Quantum Key Distribution Protocol. In: International Research Journal of Engineering and Technology, 3(10).
- Staacks, S., Heinke, H., Stampfer, C. (2018a). Smarte Experimente. In: Physik Journal 17(11).
- Staacks, S., Hütz, S., Heinke, H., Stampfer, C. (2018b). Advanced tools for smartphone-based experiments: phyphox. In: Physics Education 53(4). Verfügbar unter: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6552/aac05e>.
- Westfälische Wilhelms-Universität Münster (Stand 10/2024). O3Q. BB84-Protokoll. URL: <https://o3q.de/bb84/>.