

## Smartphone-gestützte Experimente zur Quantenphysik

- Motivation, Vorstellung und Entwicklungsprozess -

Johannes Schlaf\*, Dominik Dorsel\*, Sebastian Staacks<sup>+</sup>, Christoph Stampfer<sup>+</sup>, Heidrun Heinke\*

\*I. Physikalisches Institut IA, RWTH Aachen University

<sup>+</sup>II. Physikalisches Institut A, RWTH Aachen University

schlaf@physik.rwth-aachen.de, staacks@physik.rwth-aachen.de

### Kurzfassung

Gängige Schulerperimente zur Quantenphysik sind häufig komplex und/oder stellen eine Art „Black Box“ für SchülerInnen dar, welche nicht vollständig verstanden wird. Zudem wird typischerweise kostenintensives Equipment benötigt, sodass anstelle von Schülerexperimenten häufig nur Simulationen durchgeführt werden. Aus diesem Grund wurden Schülerexperimente zur Quantenphysik und Quantentechnologie mit übersichtlichen, leicht verständlichen Aufbauten entwickelt, welche das schülereigene Smartphone mithilfe der App phyphox für die Messdatenerfassung und -darstellung nutzen. Hierbei handelt es sich (i) um ein Experiment zur Bestimmung des Planck'schen Wirkungsquantums sowie (ii) um ein Analogieexperiment zur quantenkryptographischen Übertragung von Schlüsseln mithilfe des BB84-Protokolls. Dabei wurde das Experiment zur  $h$ -Bestimmung als einfach zu realisierendes DIY-Projekt ausgelegt, was nicht nur zu niedrigen Kosten führt, sondern auch zusätzliches didaktisches Potential birgt.

Beide Experimente wurden sowohl mit Studierenden als auch mit SchülerInnen im Einsatz evaluiert und weiterentwickelt.

### 1. Motivation

Moderne Smartphones sind mit einer Vielzahl interner Sensoren ausgestattet, die durch entsprechende Apps wie z.B. phyphox ausgelesen werden können [1][2][3]. Diese Sensoren, kombiniert mit der kompakten Größe der Geräte, bieten vielfältige und häufig sehr niederschwellige Möglichkeiten zum Experimentieren. Beispiele hierfür sind die Messung der Zentripetalbeschleunigung in einer Salatschleuder oder die Simulation eines Sonars durch Lautsprecher und Mikrofon [4]. Für die Nutzung im Unterricht bieten Smartphones zudem den entscheidenden Vorteil, dass in Deutschland 93 % aller Jugendlichen zwischen 12 und 19 Jahren ein solches Gerät besitzen und somit in jeder Klasse / jedem Kurs hinreichend viele mobile Messinstrumente zur Verfügung stehen [5].

Die App phyphox wird an der RWTH Aachen entwickelt und bietet neben der einfachen Erfassung und grafischen Darstellung von Messdaten auch kontextspezifische Experimente wie die Bestimmung der Frequenz eines Federpendels [4]. Zudem können externe Sensormodule über Bluetooth Low Energy (BLE) in phyphox-Experimente integriert werden, was die Möglichkeit eröffnet, Sensoren auch in Aufbauten zu verwenden, die für Smartphones nicht geeignet sind oder auf Messdaten zugreifen müssen, die von den geräteinternen Sensoren nicht erfasst werden. Mit Vorkenntnissen in den Softwareplattformen Arduino oder MicroPython für Mikrocontroller können mithilfe der Bibliothek phyphoxBLE solche Sensormodule sogar selbst erstellt bzw. nach den eigenen Wünschen programmiert werden [6]. Dies

schafft wiederum die gerade für den MINT-Unterricht interessante Option, externe Sensormodule als DIY-Projekte (DIY = do it yourself) zu realisieren [7]. Diese sind in der Regel deutlich kostengünstiger als kommerzielle Lehrmittel und bieten auch die Möglichkeit, Reparaturen eigenständig durchzuführen. Zudem eröffnen sie SchülerInnen auch vielfältige weitere Lerngelegenheiten.

Im Rahmen des Zusammenbaus der Sensormodule können SchülerInnen z.B. praktische Erfahrungen mit Formgebungsverfahren wie 3D-Druck und mit der Programmierung von Mikrocontrollern sammeln. Diese aktiv-handwerklichen und aktiv-kognitiven Tätigkeiten können sich auch positiv auf das Interesse und Engagement der SchülerInnen auswirken [8].

Im schulischen Kontext existiert ein Mangel an Realexperimenten zur Quantenphysik, was in der Unterrichtspraxis zu einer gehäuften Nutzung von Simulationen führt [9]. Dies steht jedoch im Widerspruch zu den Empfehlungen des Kernlehrplans Physik für die Oberstufe des Landes Nordrhein-Westfalen, welcher Realexperimenten ausdrücklich den Vorzug gegenüber Simulationen gibt [10]. Darüber hinaus kann der Einsatz von Simulationen für ein niedrigeres Schülerinteresse sorgen [8]. Oft sind typische Experimente wie z.B. zum Photoeffekt, die auch im Kernlehrplan genannt werden, relativ komplex und mit hohen Kosten der Aufbauten verbunden, was ihre Nutzung häufig auf den Einsatz als Demonstrationsexperimente beschränkt. Gleichzeitig nennt der Kernlehrplan jedoch das eigenständige Experimentieren der SchülerInnen als Teil der zu erwerbenden Sachkompetenz

[10]. Vor diesem Hintergrund besteht ein Bedarf an geeigneten Schülerexperimenten zur Quantenphysik. Das Ziel des Projekts ist es, das bestehende Ensemble der Experimente zur Quantenphysik für die Physiklehre durch niederschwellig einsetzbare Schülerexperimente zu erweitern. Ein zentraler Ansatzpunkt dabei ist der Einsatz des Smartphones als breit verfügbares und vielseitig einsetzbares Messinstrument. Bei der Konzeption der Experimente wurde zudem darauf geachtet, dass sie auch auf Tablets durchführbar sind, um eine möglichst breite Zugänglichkeit im schulischen Umfeld sicherzustellen. Die Nutzung der App phyphox als Datenschnittstelle ermöglicht dabei die Integration externer Sensormodule. Im Rahmen dieses Projekts wurden bislang zwei Schülerexperimente entwickelt, die in den folgenden beiden Abschnitten vorgestellt werden. Diese Experimente wurden für den Einsatz in der Oberstufe weiterführender Schulen entwickelt, sind aber auch für die Physikausbildung an Hochschulen geeignet.

## 2. Experiment zur Bestimmung des Planck'schen Wirkungsquantums

### 2.1. Grundlegende Funktionsweise

Das Experiment nutzt den Zusammenhang zwischen der Photonenenergie des von Leuchtdioden (LEDs) emittierten Lichts und der Schwellenspannung der LEDs. Mithilfe des entwickelten Aufbaus werden die Schwellenspannungen verschiedener LEDs mit bekannter Frequenz des emittierten Lichts ermittelt. Hierzu wird eine Ausgleichsgerade durch den lokal linear annäherbaren Bereich der Kennlinie der LED gelegt. Deren Nullstelle entspricht näherungsweise der Schwellenspannung. Um das Experiment anschaulicher zu gestalten, wird die seit kurzem verfügbare Möglichkeit genutzt, in phyphox auf die Kamera des Smartphones oder Tablets zuzugreifen und damit statt der Strom-Spannungs-Kennlinie der LED eine Kennlinie ihrer Leuchtdichte (Lichtstärke pro Fläche) über der angelegten Spannung aufgenommen. Für hinreichend kleine Ströme entspricht diese Kennlinie bei vielen LEDs bis auf einen Vorfaktor näherungsweise der Strom-Spannungs-Kennlinie und ermöglicht deshalb in gleicher Weise die Ermittlung der Schwellenspannung [11].

Das Planck'sche Wirkungsquantum wird als Steigung einer Ausgleichsgeraden in der Auftragung der Energien der Photonen, die aus der jeweiligen Schwellenspannung ermittelt werden, über der zugehörigen Lichtfrequenz bestimmt [12].

Der Aufbau ist in Abbildung 1a in Funktion und in Abbildung 1b mit wichtigen Einzelteilen zu sehen. Er besteht aus:

- einem Smartphone, auf dem die App phyphox installiert ist,
- der mit phyphox über BLE koppelbaren sogenannten phyphox:h-Box, welche eine

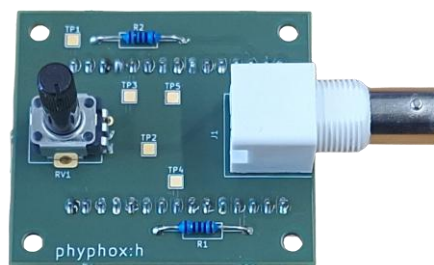


a) Aufbau während einer Messung. Eigene Darstellung.



b) Die zu fertigenden Module des Aufbaus. (1) LED-Einsätze. (2) phyphox:h-Box zur Spannungsausgabe. (3) Stabilisierungshilfe. (4) Abdunklungsbox mit weißem Reflexionsmaterial. Eigene Darstellung.

**Abb. 1:** Aufbau zur Bestimmung des Planck'schen Wirkungsquantums.



**Abb. 2:** Fertig gelötete Platine der phyphox:h-Box. Eigene Darstellung.

variable Spannung ausgibt und den momentanen Spannungswert an phyphox sendet,

- sowie einer sogenannten Abdunklungsbox, in die austauschbare LED-Einsätze eingeführt werden können.

Die phyphox:h-Box wird von dem Smartphone mit Spannung versorgt und kann variable Spannungen von 0 V bis 3,1 V ausgeben. In ihr ist ein in Arduino programmierter BLE-fähiger ESP32-Mikrocontroller verbaut. Die Variation der Spannung erfolgt wahlweise über einen Drehknopf oder über phyphox.

Die Abdunklungsbox wird an die phyphox:h-Box angeschlossen und so mit Spannung versorgt. Das Smartphone wird unter Nutzung der Stabilisierungshilfe so auf der Abdunklungsbox platziert, dass sich die Hauptkamera über dem in Abbildung 1b sichtbaren weißen Reflexionsmaterial befindet. Über die Kamera wird in phyphox die Beleuchtungsstärke am Reflexionsmaterial gemessen, welche proportional zur Leuchtdichte der LED ist (siehe auch Abschnitt 2.2).

## 2.2. Designentscheidungen

Der DIY-Ansatz wurde gewählt, um eine möglichst hohe Verfügbarkeit und einen vergleichsweise niedrigen Preis zu erzielen. Zudem können SchülerInnen so auch an zusätzliche Kompetenzen wie die Programmierung, den 3D-Druck und das Lötten herangeführt werden.

Dementsprechend wurde der Aufbau so konzipiert, dass die Fertigung auch Lehrkräften und SchülerInnen mit wenig oder gar keiner Vorerfahrung bezüglich des Lötens oder der Programmierung von Mikrocontrollern möglich ist. Um das Lötten zu vereinfachen, werden auf der in der phyphox:h-Box verbauten Platine ausschließlich Durchsteckbauteile verwendet (siehe Abbildung 2). Die Anzahl der Lötunkte ist zudem vergleichsweise niedrig. Eine detaillierte Bauanleitung sowie der für die Programmierung des verbauten Mikrocontrollers notwendige Code werden kostenlos online zur Verfügung gestellt.

Als Mikrocontroller wurde ein ESP32 gewählt, da dieser einfach in Arduino programmierbar ist und zudem über einen DAC (Digital Analog Converter) verfügt. Dieser ist für diesen Versuch essentiell, da ohne DAC ausgegebene Spannungen lediglich Effektivspannungen eines pulsweitenmodulierten, digitalen Signals darstellen, mit denen sich keine Schwellenspannung bestimmen lässt.

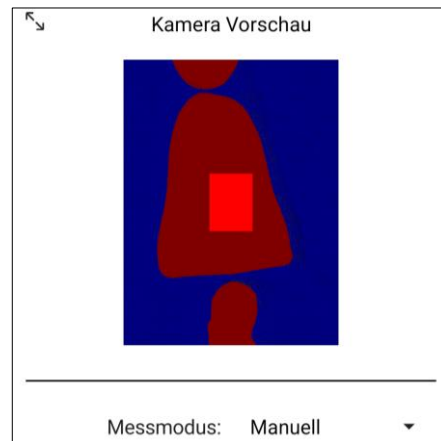
Um Messungen auch in nicht abgedunkelten Räumen zu ermöglichen bzw. die Notwendigkeit der Korrektur eines Offsets in der LED-Kennlinie zu umgehen, wurde eine Abdunklungsbox konzipiert, welche durch das auf der Box platzierte Smartphone vollständig abgedeckt wird. Im Rahmen mehrerer Testläufe (siehe Abschnitt 3) wurde dabei ein Design entwickelt, bei dem die Abdunklungsbox selbst mit Spannung versorgt wird und in welche verschiedene LED-Einsätze eingespannt werden können (siehe Abbildung 3). Um eine mechanische Überbelastung der elektrischen Kontaktstellen zu vermeiden, werden die Anschlusskabel durch eine Zugentlastung geführt.

Unter den eingeschobenen LEDs befindet sich ein weißes Reflexionsmaterial. Dieses wurde eingefügt, weil beim direkten Messen der Leuchtdichte von LEDs mit der Kamera häufig auch bei sehr geringen Leuchtdichten in einigen Bildbereichen schon eine Überbelichtung auftritt. Da eine Überbelichtung bei der digitalen Kamera eine Sättigung von Pixeln bedeutet, kann sie zu einer Verfälschung der Kennlinie führen und ist somit während der Messung zu vermeiden. Deshalb wird in der jetzt realisierten Konfiguration die Beleuchtungsstärke des angestrahlten Reflexionsmaterials gemessen.

Um eine möglichst hohe Flexibilität beim Einsatz der Experimentiermaterialien zu gewährleisten, wurde für die Spannungssteuerung die phyphox:h-Box als separates Modul konzipiert. Zum einen können sich Lehrkräfte so aussuchen, ob sie den vollständigen Aufbau fertigen oder nur die Abdunklungsbox bauen und einen Mikrocontroller ohne Gehäuse zur Span-



**Abb. 3:** Unterseite der Abdunklungsbox mit eingespanntem LED-Einsatz. Eigene Darstellung.



**Abb. 4:** Kameravorschau mit der Anzeige überbelichteter Bereiche (rot). Eigene Darstellung.

nungssteuerung nutzen. Zum anderen kann so die phyphox:h-Box auch noch für weitere Projekte unabhängig von der Abdunklungsbox genutzt werden (siehe auch Abschnitt 6). Aus diesem Grund wurde hier als Anschluss auch eine BNC-Buchse gewählt.

Die zu fertigenden Module wurden als 3D-Druck-Bauteile konzipiert, da so die notwendigen Geometrien zur Anordnung und Fixierung der Komponenten in einem Druck generiert werden können. Dabei ist nur wenig Nachbearbeitung wie z.B. das Entfernen von Stützstrukturen erforderlich. Zudem wird der 3D-Druck im Schulkontext zunehmend relevanter, wie z.B. die Herausgabe einer entsprechenden Handreichung durch das Landesinstitut für Schule des Landes Nordrhein-Westfalen belegt [13].

## 2.3. Umsetzung in phyphox

Der Aufbau verwendet ein speziell konzipiertes phyphox-Experiment, welches über Bluetooth von der phyphox:h-Box heruntergeladen werden kann. In der Bedienoberfläche des phyphox-Experiments finden die NutzerInnen drei Reiter, die zu unterschiedlichen Phasen des Experiments gehören.

Im ersten Reiter befindet sich eine Kameravorschau, welche zur korrekten Platzierung der Kamera verwendet wird. Die Vorschau nutzt den phyphox-eigenen Falschfarbenmodus, in dem über- und unterbelichtete Bereiche rot bzw. blau angezeigt werden (siehe Abbildung 4). Zudem lässt sich in dem Reiter der Messmodus einstellen, d.h. ob die phyphox:h-Box über den manuellen Drehregler oder die App gesteuert werden soll.

Der zweite Reiter dient der Bestimmung der Schwellenspannung (siehe Abbildung 5). Hier wird die aufgenommene Kennlinie der LED aufgetragen. Anschließend muss ein zu berücksichtigender Intensitätsbereich für die Platzierung der Ausgleichsgeraden angegeben werden, welche automatisch berechnet und aufgetragen wird. Als Schwellenspannung wird die Nullstelle der Ausgleichsgeraden ausgegeben. Die Schwellenspannung kann zusammen mit der zugehörigen Wellenlänge abgespeichert und die aufgenommene Kennlinie kann gelöscht werden.

Die abgespeicherten Datenpaare werden im dritten Reiter dargestellt (siehe Abbildung 6). Sie werden zudem in Photonenenergie-Frequenz-Wertepaare umgerechnet und mit einer durch den Ursprung verlaufenden Ausgleichsgerade aufgetragen. Die Steigung der Ausgleichsgerade entspricht nach den theoretischen Überlegungen dem Planck'schen Wirkungsquantum. Versichtlich gelöschte oder durch einen möglichen Abbruch der Bluetooth-Verbindung verloren gegangene Datenpaare (siehe Abschnitt 5) können manuell durch Angabe von Wellenlänge und Schwellenspannung wieder hinzugefügt werden.

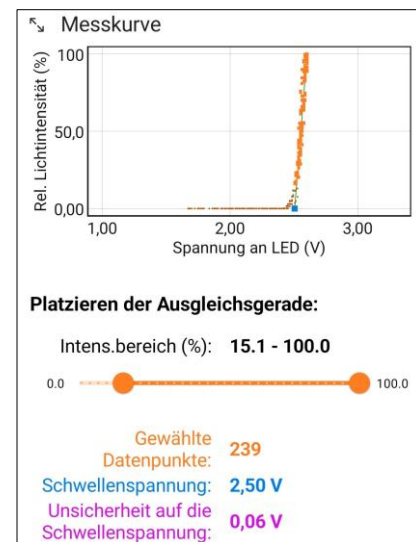
Eine Auftragung unter Berücksichtigung der Messunsicherheiten ist in phyphox derzeit nicht möglich. Sollen im Unterricht die Unsicherheiten im Experiment thematisiert werden, muss eine manuelle Auftragung der Datenpaare wie in Abbildung 7 erfolgen. Der dort erhaltene Wert stimmt im Rahmen der Messunsicherheiten mit der Planck-Konstante überein und ist repräsentativ für die mit dem hier gezeigten Aufbau erzielbaren Ergebnisse.

### 3. Analogieexperiment zum BB84-Protokoll

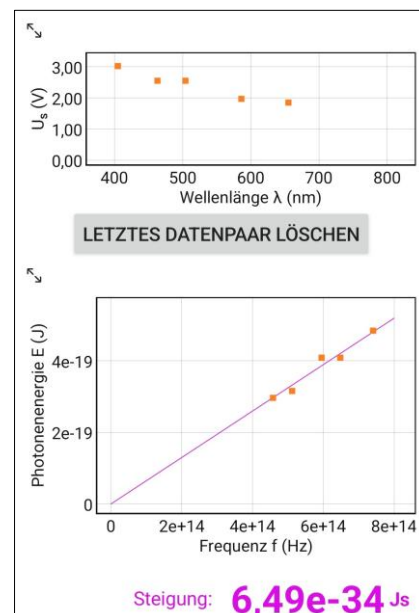
#### 3.1. Hintergrund

Das BB84-Protokoll ist ein Verfahren zum quantenkryptographischen Austausch digitaler Schlüssel zwischen zwei Akteuren. Das Verfahren nutzt Einzelphotonen in vier verschiedenen, um  $45^\circ$  bzw.  $90^\circ$  paarweise zueinander gedrehten Polarisationszuständen. Die Akteure werden in der Fachliteratur üblicherweise als Alice (Sender) und Bob (Empfänger) bezeichnet. Alice schickt Einzelphotonen mit zufälligen Polarisationsrichtungen an Bob, welcher die Polarisationen in zufällig gewählten Messbasen misst. Aus den Messungen kann ein Schlüssel generiert werden [14]. Da Einzelphotonen weder aufteilbar noch kopierbar sind, muss ein Spitzel (typischerweise Eve, abgeleitet vom engl. „eavesdropping“) die von Alice gesendeten Einzelphotonen abfangen und selbst Einzelphotonen an Bob schicken. Hierdurch wird der Übertragungsvorgang gestört, sodass kein funktionierender Schlüssel generiert werden kann.

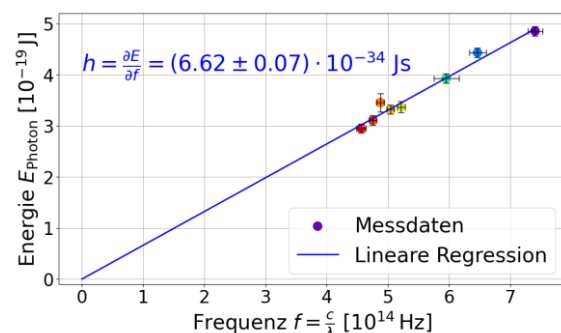
Da das BB84-Protokoll eine Möglichkeit darstellt, auch in Zeiten von Quantencomputern eine sichere Verschlüsselung zu gewährleisten, lässt es sich als relevante Zukunftstechnologie im Physikunterricht thematisieren [10][14]. Aufgrund der sehr hohen Kosten und der anspruchsvollen Handhabung von



**Abb. 5:** Bestimmung der Schwellenspannung einer LED in phyphox. Eigene Darstellung.



**Abb. 6:** Exemplarische Bestimmung des Planck'schen Wirkungsquantums in phyphox anhand der Schwellenspannungen fünf verschiedener LEDs. Eigene Darstellung.



**Abb. 7:** Bestimmung des Planck'schen Wirkungsquantums mit aus dem Aufbau generierten Messdaten. Eigene Darstellung.



Einzelphotonenquellen werden zur Erläuterung des BB84-Protokolls (nicht nur im Schulkontext) meist Analogieexperimente eingesetzt [15].

### 3.2. Umsetzung

In dem konzipierten Analogieversuch werden die Polarisationszustände durch vier verschiedene, in phyphox angezeigte Farben symbolisiert. Für den Versuch wird kein separater Aufbau benötigt, sondern lediglich zwei bis drei Smartphones pro Schülergruppe. Für jede der beteiligten Rollen (Alice, Bob, Eve) existiert eine separate phyphox-Experimentkonfiguration:

Im Alice-Experiment (siehe Abbildung 8) wird automatisch ein zufälliger Polarisationszustand erzeugt. Die hierfür notwendigen Zufallszahlen stammen aus dem weißen Rauschen des Beschleunigungssensors. Die dem Polarisationszustand zugeordnete Farbe wird zur Kommunikation mit Bob in einer Falschfarbendarstellung angezeigt.

Im Bob-Experiment kann die Farbe mithilfe der Smartphone-Kamera eingelesen werden (siehe Abbildung 9). Der Polarisationszustand wird anschließend über eine zufällige Messbasis „gemessen“. Auch hier stammen die für den „Messvorgang“ benötigten Zufallszahlen aus dem Rauschen des Beschleunigungssensors.

Das Eve-Experiment vereint die Funktionalitäten von Alice und Bob. Es misst Polarisationszustände und gibt den gemessenen Zustand anschließend über ein Farbsignal an Bob weiter.

Die das Experiment durchführenden SchülerInnen können die gesendeten und gemessenen Zustände zusammen mit der gewählten Messbasis in eine außerhalb von phyphox geführte Tabelle eintragen und durch Vergleiche der Messbasen einen Schlüssel erstellen bzw. den Abhörversuch von Eve erkennen.

Wie in Abbildung 9 zu sehen ist, sind die gesendeten Polarisationszustände für Bob (und Eve) offen sichtbar. Dies ist insofern sinnvoll, als dass die SchülerInnen bei der Durchführung des Versuchs sehen, was während der Messvorgänge geschieht, und so das Konzept des BB84-Protokolls besser nachvollziehen können. Allerdings hat dies nichts mit der physikalischen Realität zu tun, in der die Sicherheit des BB84-Protokolls sich gerade aus der Tatsache ergibt, dass der gesendete Zustand eben nur Alice bekannt sein kann. Aus diesem Grund wurde ein weiteres Konfigurationsset von Alice, Bob und Eve in phyphox erstellt, in dem die gesendeten Zustände in einem separaten Reiter zur späteren Übertragung abgespeichert werden. Zudem wird in diesen Experimenten das Farbsignal über eine Folge von Pseudozufallszahlen verschlüsselt, sodass auch aus der angezeigten Farbe nicht mehr direkt auf den übermittelten Polarisationszustand geschlossen werden kann. Da für die Übertragung von Alice zu Bob/Eve bzw. von Eve zu Bob jeweils ein fester Seed für die Zahlenfolge verwendet wird, können Bob/Eve das Farb-

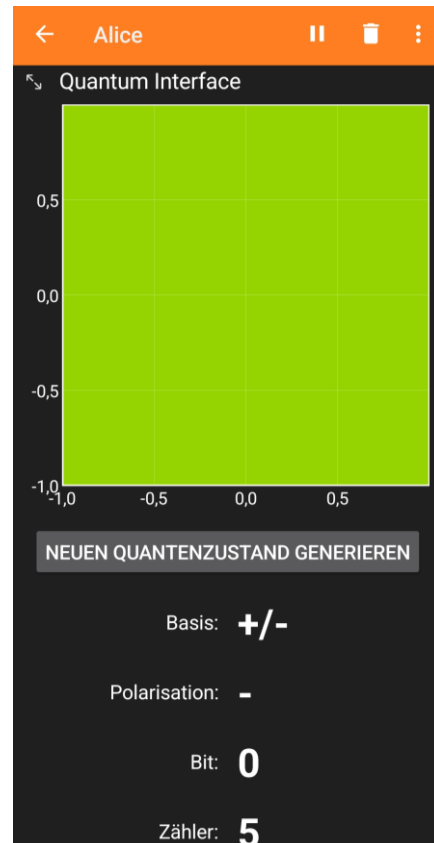


Abb. 8: Screenshot des Alice-Experiments in phyphox. Eigene Darstellung.

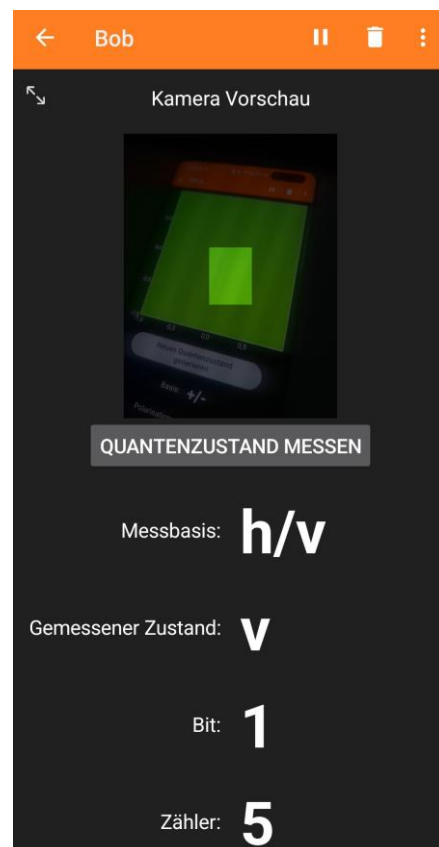


Abb. 9: Screenshot des Bob-Experiments in phyphox, während einer Messung. Eigene Darstellung.

signal aber wieder entschlüsseln, solange sich Sender und Empfänger auf der gleichen Zählerposition befinden.

Zu guter Letzt wurde ein phyphox-Experiment namens „Eve, u there?“ entwickelt. Dieses entspricht dem Alice-Experiment mit verdeckten Zuständen, allerdings kann heimlich Eve über einen separaten Reiter hinzugeschaltet werden. Die Aufgabe von Bob ist es nun herauszufinden, ob ein Abhörversuch stattgefunden hat oder nicht.

#### 4. Evaluation der Usability

Die Usability der konzipierten Experimente sowie der zugehörigen Anleitungen wurde seit dem Wintersemester 2024/25 in unterschiedlichen Settings getestet. Hierfür wurde der nutzerbasierte Ansatz des Usability Testings gewählt. In diesem werden die Experimente von ProbandInnen getestet und direktes Feedback wird eingeholt. In allen Settings geschah dies sowohl durch Beobachtung während des Versuchs (Concurrent Probing) als auch nach dem Versuch (Retrospective Probing), z.B. in Form von Praktikumsberichten oder Feedbackrunden. Nach dem Einarbeiten des Feedbacks wird der Test mit einer weiteren Personengruppe wiederholt [16]. Insofern stellt das Usability Testing eine Form des Design-Based-Research-Ansatzes dar [17].

Mithilfe dieses Vorgehens können wichtige Parameter wie die für die Versuchsdurchführung benötigte Zeit, die Zufriedenheit, Fehlerquellen sowie notwendige Änderungen schnell ermittelt bzw. identifiziert werden [16]. Typische Schwierigkeiten wie z.B. die Rekrutierung von ProbandInnen und die damit üblicherweise verbundenen Kosten stellen dabei im Bildungskontext ein geringeres Problem dar, da die Experimente testweise in der Lehre eingesetzt werden können.

Im Wintersemester 2024/25 wurden die Versuche zunächst im Physikalischen Praktikum für Chemiestudierende mit insgesamt  $N=38$  Studierenden evaluiert. Dabei wurden beide Experimente im Durchschnitt von den Studierenden positiv aufgenommen. Allerdings wurden in dieser Entwicklungsphase bei dem Versuch zur  $h$ -Bestimmung wiederholt zwei Punkte kritisiert: die mangelnde Stabilität der Bluetooth-Verbindung sowie der aufwändige Wechsel der zu diesem Zeitpunkt noch einzeln an die phyphox:h-Box anzuschließenden LED-Einsätze. Als Reaktion auf letzteren Punkt wurde die Abdunklungsbox zum derzeitigen Stand weiterentwickelt. Von den ProbandInnen wurde zusätzlich ein eingeschränkter Workflow bei der Versuchsdurchführung bemängelt, was teilweise durch Unklarheiten in den Anleitungen, teilweise durch Beschränkungen in den Bedienelementen von phyphox verursacht wurde. Ein weiterer, hiermit verbundener Kritikpunkt war die für die Versuche zu gering bemessene Versuchszeit, was insbesondere den Versuch zum BB84-Protokoll betraf.

Im Januar 2025 wurden beide Versuche im Rahmen der alljährlichen Schulphysikwoche der RWTH Aachen erstmals mit OberstufenschülerInnen getestet. Auch hier war die Resonanz der 19 ProbandInnen prinzipiell gut. Die neue Abdunklungsbox stieß auf Anklang, sodass dieses Problem in diesem Entwicklungsschritt ausgeräumt war. Die Stabilität der Bluetooth-Verbindung und der eingeschränkte Workflow wurden auch in dieser Testphase kritisiert. Der Hauptkritikpunkt zum BB84-Experiment war, dass zwar Schlüssel erstellt, aber keine Nachrichten verschlüsselt werden.

Im Nachgang der zweiten Testphase wurden weitere Entwicklungsschritte vollzogen. Im Ergebnis ist das Bluetooth-Problem zum jetzigen Zeitpunkt durch eine Anpassung der Datenrate und eine Umstrukturierung der Datenverarbeitung im zugehörigen phyphox-Experiment behoben. Das Workflow-Problem wurde durch Einbindung von seit April 2025 verfügbaren neuen phyphox-Bedienelementen wie z.B. Schieberegler (siehe auch Abbildung 5) sowie durch eine Überarbeitung der Anleitungen adressiert. Eine Lösung bezüglich der Nachrichtenverschlüsselung ist derzeit in Planung (siehe Abschnitt 6).

Seit Mai 2025 finden Lehrkräfteworkshops statt, in denen die Aufbauten ebenfalls unter anderem hinsichtlich ihrer Usability evaluiert werden. Hierbei werden auch die neuen Bedienelemente in den phyphox-Experimenten sowie die Bauanleitung für den DIY-Aufbau getestet. Ein erster Workshop hat neben einer Verbesserung des Workflows gezeigt, dass die Fertigung der DIY-Aufbauten auch für Lehrkräfte ohne Vorerfahrung im Löten und 3D-Druck in max. 90 min je Aufbau machbar ist.

#### 5. Zwischenfazit

Basierend auf dem bisherigen Feedback ist es gelungen, zwei zuverlässig funktionierende Versuche mit für den Schuleinsatz hinreichend gutem Workflow zu erstellen. Für beide Experimente werden i.d.R. jeweils unter 90 Minuten benötigt. Bei der BB84-Analogie reicht diese Zeit je nach geplantem Umfang auch für eine theoretische Einführung.

Der DIY-Aufbau zur Ermittlung der Planck-Konstante lässt sich anhand erster Ergebnisse auch von Lehrkräften ohne jegliche Vorerfahrung im DIY-Bereich in höchstens 90 Minuten fertigen. Die Materialkosten liegen hierbei bei etwa 45 €.

Beide Experimente weisen allerdings auch konzeptionsbedingte Einschränkungen auf. Aufgrund der Maximalspannung von 3,1 V im Aufbau zum Planck'schen Wirkungsquantum ist das Messen der Schwellenspannung von LEDs mit einer Wellenlänge von unter 420 nm nicht mehr zielführend und unter 400 nm gar nicht möglich. Das Analogieexperiment zum BB84-Protokoll stößt bei einigen Smartphone-Modellen auf Schwierigkeiten, bei denen der Beschleunigungssensor nur nach Überschreiten einer bestimmten Schwelle neue Daten schickt oder die

Daten ab einer bestimmten Dezimalstelle abschneidet. Im ersten Fall muss zwischen zwei Aktionen das Smartphone leicht angetippt werden, im zweiten Fall ist das Smartphone für das Experiment nicht verwendbar. Eine Problematik, die beide Experimente betrifft, ist die Verortung der Halbleiterphysik (Grundlage für die  $h$ -Bestimmung) bzw. von Quantentechnologien (wie dem BB84-Protokoll) am Rande oder außerhalb des Kernlehrplans [10].

## 6. Ausblick

In den in Abschnitt 4 erwähnten Lehrkräfte-workshops wird die Usability weiterhin systematisch evaluiert. Des Weiteren werden gemeinsam mit den teilnehmenden Lehrkräften verschiedene Konzepte für die Fertigung der DIY-Aufbauten sowie den Einsatz beider Versuche in der Schule entwickelt. Diese Konzepte sollen letztendlich insbesondere Schulen mit geringen finanziellen und/oder zeitlichen Ressourcen sowie geringer Vorerfahrung und/oder Ausstattung im Maker-Bereich helfen, neue Aufbauten in Form von kostengünstigen DIY-Projekten in die Physiksammlung zu bringen.

In den kommenden Monaten werden zudem zusätzliche Experimente entwickelt, die auf den vorgestellten DIY-Aufbau zurückgreifen. Dies adressiert auch den von einigen Lehrkräften vorgebrachten Kritikpunkt, dass der Fertigungsaufwand vergleichsweise hoch ist, wenn die Aufbauten nur für ein Experiment genutzt werden können.

Um den Hauptkritikpunkt der SchülerInnen bezüglich des BB84-Protokolls zu adressieren (Schlüssel-erstellung, aber keine Verschlüsselung), wird aktuell eine Web-Erweiterung der zugehörigen phyphox-Experimente geschaffen, in der kurze Worte mit dem wie bisher erstellten Schlüssel verschlüsselt werden können.

## 7. Literatur

- [1] Dorsel, Dominik: Entwicklung der Nutzbarkeit externer Sensoren bei Smartphone-Experimenten und deren Einsatz in naturwissenschaftlichen Experimenten, Dissertation, RWTH Aachen University (2023), S. 7-8. Verfügbar unter: <https://www.institut-1a.physik.rwth-aachen.de/go/id/huji/lidx/1/file/964136>
- [2] Staacks, Sebastian; Hütz, Simon; Heinke, Heidrun; Stampfer, Christoph: Advanced tools for smartphone-based experiments: phyphox. In: Physics Education 53 (2018), Nr. 4. Verfügbar unter: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6552/aac05e>
- [3] Staacks, Sebastian; Heinke, Heidrun; Stampfer, Christoph: Smarte Experimente. In: Physik Journal 17 (2018), Nr. 11.
- [4] Phyphox: Experimente (Stand 05/2025). URL: <https://phyphox.org/de/experimente/>.
- [5] Medienpädagogischer Forschungsverbund Südwest: JIM-Studie 2024: Jugend, Information, Medien (2024). Verfügbar unter: <https://mpfs.de/studie/jim-studie-2024/>
- [6] Phyphox: Bluetooth Low Energy (Stand 05/2025). URL: <https://phyphox.org/de/ble-de/>.
- [7] Dorsel, Dominik; Staacks, Sebastian; Heinke, Heidrun; Stampfer, Christoph; Kuhn, Jochen; Wilhelm, Thomas: Visualisierung von Messdaten eigener Sensormodule mit phyphox. In: Physik unserer Zeit 53 (2023), Nr. 3, S. 151--152.
- [8] Herbst, Markus; Fürtbauer, Eva-Maria; Strahl, Alexander: Interesse an Physik. DPG-Frühjahrstagung, Hannover (2016).
- [9] Breuer, Judith; Vogelsang, Christoph; Reinhold, Peter: Nutzungsverhalten von Lehrkräften bei der Implementierung einer physikdidaktisch innovativen Unterrichtskonzeption. In: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften 29 (2022), Nr. 1, S. 1-13.
- [10] Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalen: Kernlehrplan für die Sekundarstufe II Gymnasium / Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen (2022).
- [11] Avago Technologies: HLMP-CExx Data Sheet (Stand 05/2025). Verfügbar unter: [https://www.mouser.de/datasheet/2/678/avago\\_HLMP-CExx-1217257.pdf](https://www.mouser.de/datasheet/2/678/avago_HLMP-CExx-1217257.pdf).
- [12] Pili, Unofre; Violanda, Renante: Smartphone-based measurement of the Planck's constant with light-emitting diodes. In: Physics Education 53 (2019), Nr. 4.
- [13] Qualitäts- und UnterstützungsAgentur – Landesinstitut für Schule: 3-D-Druck in der Schule: Informationen und Orientierung für den Einstieg in den Unterricht (Stand 05/2025). Verfügbar unter: <https://www.schulentwicklung.nrw.de/cms/faecher/faecheruebergreifend/3d-druck-in-der-schule.html>.
- [14] Reddy, Sujaykumar; Mandal, Sayan; Mohan, Chandra: Comprehensive Study of BB84, A Quantum Key Distribution Protocol. In: International Research Journal of Engineering and Technology 3 (2023), Nr. 10, S. 1023-1034.
- [15] Westfälische Wilhelms-Universität Münster: O3Q. BB84-Protokoll (Stand 05/2025). URL: <https://o3q.de/bb84/>.
- [16] Kaminski, June: Theory applied to informatics – Usability. In: Canadian Journal of Nursing Informatics 15 (2020), Nr. 4.
- [17] Schmiedebach, Mario; Wegner, Claas: Designed-Based Research als Ansatz zur Lösung praxisrelevanter Probleme in der fachdidaktischen Forschung. In: Bildungsforschung 2 (2021), S. 1-10.