

Entwicklung von Analogie-Experimenten zum quantenmechanischen Messprozess

Stefan Ahle*, Philipp Scheiger⁺, Holger Cartarius*

* AG Fachdidaktik der Physik und Astronomie, Friedrich-Schiller-Universität Jena
August-Bebel-Str. 4, 07743 Jena,
stefan.ahle@uni-jena.de

⁺ Physik und ihre Didaktik, 5. Physikalisches Institut, Universität Stuttgart,
philipp.scheiger@uni-jena.de

Kurzfassung

Quantenphysikunterricht steht von Natur aus vor der Herausforderung, den Lernenden ein Thema näher zu bringen, das scheinbar gegen jede alltägliche Intuition geht. Umso wichtiger scheint es, in einer multiperspektivischen Herangehensweise verschiedene Repräsentationen für das komplexe Verhalten von Quantenobjekten zu wählen. Im Folgenden bieten wir eine Repräsentation zum Verhalten von Einzelphotonen an Polarisationsfiltern an, die auf der Zusammenarbeit von 3D-Druck, Arduino-Microcontrollern und NFC-Chips basiert. Besonderer Fokus dieser Analogie fällt dabei auf den quantenphysikalischen Messprozess.

1. Motivation

Die Bildungsstandards der Kultusministerkonferenz 2020 sehen vor, über „grundlegende Aspekte der Quantentheorie“ hinaus, Themen und Inhalte der modernen Physik zu behandeln und so ein „quantenphysikalisches Weltbild hinsichtlich der Begriffe Realität, Lokalität, Kausalität, Determinismus“ [1] zu vermitteln. Damit rückt die Quantenphysik als Randthema, für das am Ende des Schuljahres selten noch Zeit bleibt, immer mehr in den Fokus des Oberstufenphysikunterrichts. Das heißt zum einen, dass sie in kommenden Lehrplänen größeren Raum einnehmen wird und zum anderen, dass der Bedarf an unterstützenden Lehr-Lern-Materialien steigt. Von Lehrerinnen und Lehrern wird nun gefordert, Inhalte abzuhandeln, die zu ihren eigenen Schul- und Studienzeiten nur sehr grundlegend oder eventuell gar nicht diskutiert wurden, insbesondere weil deren experimentelle Nachweise teils noch ausstehen. Um so wichtiger scheint es, Lehrkräfte nun gezielt zu unterstützen und eine Vielfalt an Materialien, die in jeden Schulphysik-Etat passen, zur Auswahl zu stellen. Dabei gilt es insbesondere, solche Elemente einzubauen, die es den Lernenden ermöglichen, einen Einblick in die moderne Quantenphysik und -technologien zu bekommen. Dafür geeignete Lehrkonzepte wie die Wesenszüge der Quantenphysik [2] oder schultaugliche Analogversuche wie der Quantenradierer [3] stehen dabei prinzipiell schon sehr lange zur Verfügung. Aktuelle Ansätze und auch komplett ausgearbeitete Lehrgänge konzentrieren sich nun auf Themen der Quantentechnologien 2.0. Dazu gehören Ansätze zum Quantencomputer [4] und Quantenzufall [5, 6] oder Versuche, neue Lehrkonzepte [7-10] an einen

sich wandelnden Schulalltag anzupassen. Durch das wachsende wirtschaftliche und gesellschaftliche Interesse stieg in den letzten Jahren ebenfalls der Bedarf an Studien [11, 12, 13], die evaluieren, wie dieses Lehrmaterial aussehen sollte, um Lernende auf eine mögliche (berufliche) Zukunft im Bereich der Quantenphysik vorzubereiten. Darüber hinaus werden Möglichkeiten der Digitalisierung vermehrt genutzt, um Bildungsangebote auf dem Gebiet der Quantenphysik voranzutreiben [14 - 16].

Das Vermitteln der Konzepte der Quantenphysik stellt jedoch eine besondere Herausforderung dar, weil sie abstrakt und uns nicht intuitiv zugänglich sind. Dadurch bleibt jede Repräsentation der Quantenphysik in besonderem Maße unvollständig und es entsteht der Bedarf, auf mehrere, unterschiedliche Repräsentationen zurückzugreifen. In dieser Arbeit möchten wir einen Ansatz vorstellen, in dem Analogieexperimente einen Zugang zum Verhalten von Quantenobjekten liefern. Dazu wird auf einen Aufbau mit Arduino-Microcontrollern und NFC-Chips zurückgegriffen. Die Chips dienen als Stellvertreter für Photonen, die einen (auf ihnen abgespeicherten) Polarisationszustand besitzen. Mittels einer selbst entwickelten Mechanik, die sich im 3D-Druck herstellen lässt, werden die Chips durch einen Aufbau gelassen (transmittiert) oder abgefangen (absorbiert), was stellvertretend für einen Polfilter steht.

Grundlegende Eigenschaften der Quantenphysik wie der Zufall im Messprozess müssen dabei zwangsweise simuliert werden, da wir es nicht mit realen Quantenobjekten zu tun haben. Diese Aufgabe übernimmt ein entsprechend programmierter Arduino-

Microcontroller. Die Simulation soll bewusst thematisiert werden, um aufzuzeigen, dass sich Quantenobjekte prinzipiell anders als klassisches Verhalten und ein Eingreifen in Form einer Simulation notwendig ist, um die Quantenphysik mit klassischen Objekten nachstellen zu können.

Selbstverständlich hat auch die hier gewählte Repräsentation der Quantenphysik entscheidende Schwächen. So können die analogen Objekte angefasst werden und sind lokalisierte klassische Gegenstände. Es ist daher auch hier nicht angedacht, diese Analogieexperimente als einzigen Zugang zu wählen. Die Ansprüche, die jedoch an das Analogie-Experiment gestellt werden, sind:

- Die Versuche, die mit dem Modell konstruiert werden, geben Ergebnisse echter quantenphysikalischer Experimente genau wieder.
- Jede Manipulation, die nötig ist, um im makroskopischen Aufbau die Ergebnisse eines Quantensystems nachzustellen, kann offengelegt werden. Es wird klar: ein klassisches System verhält sich nicht wie ein Quantensystem, außer man „trickst“.
- Das Lernen am Modell macht die abstrakten Themen der Quantenphysik nahbarer. Unterstützend zu theoretischen Inhalten und praktischen Realexperimenten eröffnet die Analogie einen weiteren Zugang zu einem Fachbereich, der für die meisten Lernenden gegen die klassische Intuition geht.

Damit lassen sich bereits einige Eigenheiten der Quantenphysik wie der Zufall des Messprozesses, die stochastische Vorhersagbarkeit, die Eindeutigkeit der Messung oder die Umpräparation eines Zustandes durch die Messung verdeutlichen. Wir gehen dazu wie folgt vor. In Kapitel 2 rufen wir die wichtigsten Aspekte des Polarisationsexperimentes im Rahmen einer klassischen und quantenphysikalischen Betrachtung in Erinnerung. Damit stellen wir in Kapitel 3 das entwickelte Analogieexperiment vor und verdeutlichen, wie es eingesetzt werden kann. In Kapitel 4 geben wir einen Ausblick auf die Weiterentwicklung.

2. Polarisationsexperiment

Die Polarisation spielt als physikalisches Phänomen in vielen technischen Bereichen eine wichtige Rolle. Bereits seit Beginn des 20. Jahrhunderts macht man sich den Wellencharakter des Lichts zu Nutze, um optische Effekte zu manipulieren und das Verhalten von elektromagnetischer Strahlung zu beeinflussen. Firmen wie Zeiss und Kodak machten sich einen Namen durch den kommerziellen Vertrieb von Polarisationsfiltern zur Verwendung in der Fotografie. Optische Instrumente wie Mikroskope verbesserten ihre Darstellungsqualität und erweiterten ihren Einsatzbereich. Darüber hinaus profitiert heute die breite Öffentlichkeit von Anwendungen optischer Polfilter: von Sonnenbrillen, über LCD-Anzeigen, bis hin zu Autoscheinwerfern [17].

Was all diese Anwendungen gemein haben, ist, dass sie sich hauptsächlich makroskopische Effekte des Phänomens zunutze machen und Lichtintensität selektiv abschwächen, indem sie – je nach Orientierung – nur einen gewissen Anteil der Gesamtmenge an Photonen transmittieren, während der Rest absorbiert wird. Außerdem ändert das Licht seinen Polarisationszustand: nach der Transmission unterscheidet man zwischen linear und zirkular polarisiertem Licht. Betrachtet man auf einer quantenphysikalischen Ebene das Verhalten einzelner Photonen, ergeben sich eindeutige Unterschiede zur kontinuierlichen, klassischen Perspektive. Trotzdem ist die klassische Perspektive gut geeignet, um eine Analogie-Brücke zur Quantenphysik zu schlagen (siehe z.B. in [3]).

An folgendem Polarisationsversuch werden nun die Perspektive der klassischen Elektrodynamik und der Quantenphysik verglichen. Anschließend wird gezeigt, wie das vorliegende Analogieexperiment eine didaktische Erarbeitung des Phänomens unterstützen und so Bestandteil eines modernen Quantenphysikunterrichts werden kann.

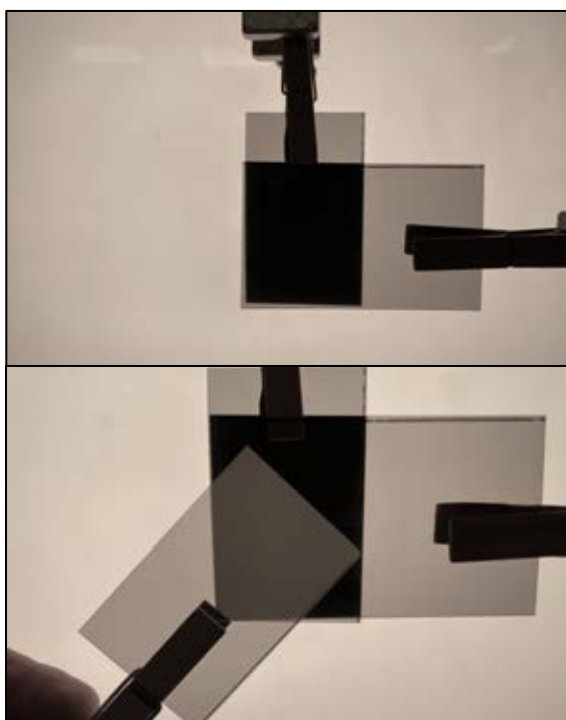


Abb. 1: Freihandversuch zur Polarisation von Licht im Physikunterricht. Oben: Zwei 90° zueinander verdrehte Polarisationsfilter blockieren beinahe die Gesamtintensität einer Lichtquelle. Unten: Wird ein dritter, zum ersten 45° verdrehter, Filter zwischen die beiden ursprünglichen Filter gesetzt, passiert ein größerer Anteil des Lichts die Anordnung als zuvor.

Hält man einen Polfilter für eine lineare Polarisierung vor eine Quelle „unpolarisierten“ Lichts (also Lichts, in dem alle Polarisationsrichtungen vorkommen, siehe unten) und fügt dann einen zweiten Filter, der um 90° zum ersten verdreht ist, hinzu, wird im idealisierten Fall das gesamte Licht absorbiert. Fügt man

nun jedoch einen dritten Filter zwischen Filter 1 und Filter 2 ein, 45° zu beiden verdreht, so wird doch ein Teil des Lichts transmittiert. Wieso absorbieren drei Filter weniger Licht als zwei? Abbildung 1 stellt dieses Phänomen in einem schultauglichen Freihandversuch anschaulich dar und wir möchten die bekannten Grundlagen hier kurz für das Aufzeigen der später gewählten Analogie in Erinnerung rufen. Benötigt werden ausschließlich drei Teile der gleichen Polarisationsfolie und eine herkömmliche Lichtquelle.

2.1. Klassische Erklärung

Klassisch versteht man Licht als elektromagnetische Transversalwelle, deren E- beziehungsweise B-Feldvektoren in alle Richtungen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung schwingen können. Passiert diese Welle einen linearen Polfilter, werden nur die Anteile transmittiert, deren Schwingungsrichtung der Polarisationsachse (Durchlassrichtung) des Filters entsprechen. Durch den Durchlauf eines Filters halbiert sich so die Intensität im Vergleich zur Ausgangsintensität des unpolarisierten Lichts. Trifft dieses nun polarisierte Licht auf einen zweiten Polfilter, gilt das Gesetz von Malus:

$$I = I_0 \cdot \cos^2(\alpha) \quad \{1\}$$

Dabei ist I_0 die Intensität vor dem zweiten Filter und I die Intensität hinter diesem. Von der Gesamtheit polarisierten Lichts werden somit nun 50% transmittiert, wenn der zweite Polfilter um 45° zum ersten verdreht ist. Folgt nach dem zweiten noch ein dritter Filter, der wiederum um 45° zum zweiten (also 90° zum ersten) Filter ausgerichtet wurde, wird erneut die Hälfte, sprich 25% von I_0 transmittiert. Dies wird in folgender Rechnung ersichtlich:

- Nach dem 1. Filter:

$$I = I_0 \quad \{2\}$$

- Nach dem 2. Filter:

$$I = I_0 \cdot \cos^2(45^\circ) = 0,5 \cdot I_0 \quad \{3\}$$

- Nach dem 3. Filter:

$$I = 0,5 \cdot I_0 \cdot \cos^2(45^\circ) = 0,25 \cdot I_0 \quad \{4\}$$

Im Gegensatz dazu lautet die Rechnung im Fall von zwei Polfiltern, die 90° zueinander verdreht sind:

- Nach dem 2. Filter:

$$I = I_0 \cdot \cos^2(90^\circ) = 0 \cdot I_0 \quad \{5\}$$

Das klassische Wellenbild des Lichts erlaubt also eine Erklärung des Phänomens mit einfachen Mitteln. So kann im schulischen Kontext auf das Thema hingeführt werden, bevor man sich anschließend quantenphysikalischen Fragestellungen widmet.

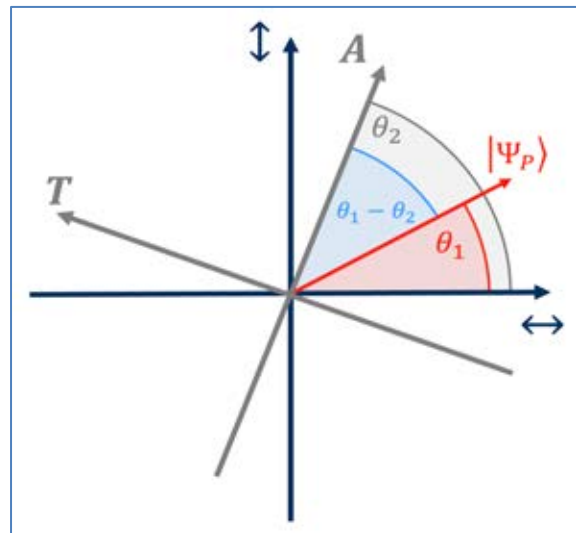


Abb.2: Um einen Polarisationszustand $|\Psi_P\rangle$ definieren zu können, wird dieser in einer horizontal-vertikalen Referenzbasis ($\leftrightarrow, \updownarrow$) dargestellt und ihm der Winkel θ_1 zugeordnet. Als nächstes wird eine Messbasis definiert, die Absorption (A) und Transmission (T) beschreibt und im Winkel θ_2 zur Referenzbasis verdreht ist. Die Absorptionswahrscheinlichkeit P_A ergibt sich in der quantenmechanischen Rechnung aus dem Betragsquadrat des Skalarprodukts aus $|\Psi_P\rangle$ und $|\Psi_A\rangle$ $\{9\}$, und somit dem Kosinusquadrat des Differenzwinkels $\theta_1 - \theta_2$.

3. Quantenphysikalische Erklärung

Das Gesetz von Malus wird hergeleitet über eine kontinuierliche Argumentation aus der klassischen Feldtheorie, in der über die Zerlegung der Komponenten der Feldvektoren die winkelabhängige Amplitude und letztlich die Intensität bestimmt werden. Für das Verhalten der unteilbaren Einzelphotonen muss die Argumentation anders lauten. Zunächst ist zu beachten, dass es kein „unpolarisiertes“ Licht gibt. Spricht man von diesem, meint man meist die Gesamtheit aller sich in einem Lichtstrahl befindlichen Photonen, die tatsächlich alle möglichen Polarisationszustände einnehmen können und im Mittel somit keine bevorzugte Polarisationsrichtung aufweisen. Trifft ein einzelnes Photon auf den Filter, so hängt dessen Passieren von seiner Absorptions- bzw. Transmissionswahrscheinlichkeit entsprechend seiner Orientierung ab – je nachdem, wie groß der Winkel zwischen Polarisation des Photons und Durchlassrichtung des Filters ist. Der exakte Wert der Wahrscheinlichkeit entspricht dabei dem Intensitätsverhältnis nach dem Gesetz von Malus aus der klassischen Betrachtung. Wird beispielsweise ein genau vertikal eingestellter Filter von einem Photon getroffen, dessen Polarisationszustand genau mit der Durchlassrichtung übereinstimmt, so besteht eine einhundertprozentige Chance, dass dieses Photon den Filter passiert. Befindet sich ein Photon im Gegensatz dazu in einem um 90° verdrehten, sprich horizontalen, Polarisationszustand, wird dieses Photonen mit gleicher

Wahrscheinlichkeit absorbiert. An dieser Stelle sollte man erkennen, dass es sich bei Photonen um Quantenobjekte handelt, die als solche den Regeln der Quantenphysik unterliegen.

Dazu gehört insbesondere, dass wir keine Aussagen über den Zustand jenes Photons machen können, sollten wir diesen nicht explizit präpariert haben, bis wir ihn messen – oder im Fall des Polarisationsfilters: Die Entscheidung, ob das Photon den Polarisationszustand des Filters annimmt, fällt erst, wenn es detektiert wird. Bis zu diesem Moment können wir nur Wahrscheinlichkeitsaussagen über dessen Verhalten treffen. Abbildung 2 versucht die Überlegungen folgender Rechnung grafisch zu unterstützen.

- Polarisationszustand in dem sich das Photon nach der Präparation befindet:

$$|\Psi_P\rangle = \sin \theta_1 |\downarrow\rangle + \cos \theta_1 |\leftrightarrow\rangle \quad \{6\}$$

- Absorptions- und Transmissionszustand werden definiert über eine zur Referenzbasis um θ_2 verdrehte Messbasis:

$$|\Psi_A\rangle = \sin \theta_2 |\downarrow\rangle + \cos \theta_2 |\leftrightarrow\rangle \quad \{7\}$$

$$|\Psi_T\rangle = \cos \theta_2 |\downarrow\rangle - \sin \theta_2 |\leftrightarrow\rangle \quad \{8\}$$

- Die Projektion des Polarisationszustand auf die Messbasis gibt Aufschluss über das Messergebnis. Um Aussagen über das Verhalten des Photons am Polfilter treffen zu können, muss dessen Absorptions- beziehungsweise Transmissionswahrscheinlichkeit ermittelt werden. Die quantenmechanische Rechnung liefert:

$$P_A = |\langle\Psi_A|\Psi_P\rangle|^2 = \cos^2(\theta_1 - \theta_2) \quad \{9\}$$

$$P_T = |\langle\Psi_T|\Psi_P\rangle|^2 = \sin^2(\theta_1 - \theta_2) \quad \{10\}$$

Im Spezialfall $\theta_1 = 0$ ergibt sich, wie oben erwähnt, dass die Wahrscheinlichkeit denselben Wert hat wie die Intensitätsaufteilung nach dem Gesetz von Malus. Das einzelne Photon wird jedoch komplett absorbiert oder durchgelassen. Erst die Statistik aus vielen Photonen reproduziert die Intensitätsverteilung und liefert im Experiment eine Information über die hier berechneten Wahrscheinlichkeiten.

4. Analogie

Um das Ziel, mit Analogie-Experimenten die Eigenheiten der Quantenmechanik greifbar zu machen, erreichen zu können, haben wir uns in diesem Aufbau für eine hybride – halb mechanische, halb digitale – Herangehensweise entschieden. Dabei kam es vor allem darauf an, die Ergebnisse der realen Versuche nachvollziehbar nachzustellen. Dazu dient vorliegende Umsetzung des Polarisationsversuchs.

Der Aufbau besteht im Wesentlichen aus der Reihenschaltung von zwei, drei oder mehreren Iterationen eines Polarisationsfiltermoduls. Dieses „Modul“ ist in Abbildung 3 darstellt und funktioniert analog zum realen Polfilter. Es „filtert“ statt Photonen münzgroße NFC-Chips, auf denen ein Polarisationszustand

gespeichert werden kann. Das Modul erlaubt dem Benutzer über ein Drehrad, eine Orientierung des Filters zwischen 0° und 90° (horizontal und vertikal) einzustellen – entsprechend der manuellen Ausrichtung eines Polfilters zur Lichtquelle. Der eingestellte Winkel wird auf einem OLED-Display an der Seite des Gehäuses abgebildet. In die Öffnung auf der Oberseite kann ein NFC-Chip geworfen werden, welcher anschließend vom RFID-Modul im Inneren gelesen wird. Als Steuerelement der gesamten Einheit dient ein Arduino MEGA-Microcontroller, der ein- und ausgehende Daten verarbeitet und entscheidet, ob der Chip „absorbiert“ oder „transmittiert“ wird. Dazu vergleicht das Gerät den auf dem Chip gespeicherten Winkel, mit dem, der am Polfiltermodul eingestellt ist. Entsprechend der Rechnung aus {9} wird eine Absorptionswahrscheinlichkeit ermittelt. Mit Hilfe einer in der Software generierten Pseudo-Zufallszahl wird entschieden, ob sich eine eingebaute Klappe nach links oder rechts öffnet und so den Chip in die eine oder andere Richtung weiterleitet. Bevor dieser jedoch durchgelassen (transmittiert) oder in ein Reservoir „absorbiert“ wird, wird er mit dem eingestellten Winkel des Polfiltermoduls beschrieben. Der Benutzer hat, wie im Realexperiment auch, nur Einfluss darüber, welcher Winkel am Polfiltermodul eingestellt ist. Schaltet man nun mehrere dieser Boxen hintereinander, lassen sich die Ergebnisse des klassischen Schulversuchs zur Polarisation von Licht mit einzelnen Photonen im Modell nachstellen.



Abb.3: Prototyp des Polarisationsmoduls zum Analogie-Experiment.

Der modulare Aufbau ist so flexibel, dass er für verschiedene Aufgaben in unterschiedlichen Lehrszenarien eingesetzt werden kann. So kann man mit einem einzelnen Filter simulieren, wie aus unpolarisiertem

Licht polarisiertes wird. Nimmt man einen zweiten identisch eingestellten Filter hinzu, kann man zeigen, dass alle Chips von diesem durchgelassen werden. Anschließend kann man das Freihandexperiment nachstellen und zeigen, dass alle Chips irgendwo absorbiert werden, wenn man zwei zueinander senkrechte Polarisationsfilter nimmt. Baut man einen dritten, um 45° verdrehten ein, sieht man, dass nach einer ausreichenden Zahl an Chips (bis auf stochastische Fluktuationen) die erwarteten 25% der durchgelassenen Chips am Ausgang auftreten. Diese Konzepte lassen sich mit beliebigen Kombinationen von Winkeln erweitern, sodass man es den Lernenden z.B. selbst überlassen kann, auf die Idee zu kommen, wie sie mehr als 25% der Chips durch den Aufbau hindurch bekommen, wenn der erste und letzte Filter weiterhin 90° zueinander verdreht sind.

Ziel der Analogie sollte es aber immer bleiben, aufzudecken, was im Realexperiment verborgen bleibt: Eine Tür an der Seite der Polarisationsmodule lässt es zu, ins Innere der Box zu spähen und deren Funktionsweise zu erraten: man erkennt die elektronischen Bauteile, die den Weg des Chips beeinflussen. Zusätzlich lässt sich die Box via USB an einen Computer anschließen. Dort kann man dann die genauen Arbeitsschritte des Microcontrollers in dessen Software in Echtzeit nachvollziehen. Hält man einen Chip an das RFID-Element der Box, erscheint der auf dem Chip gespeicherte Polarisationswinkel am Bildschirm. Außerdem wird der am Modul eingestellte Winkel angezeigt, zusammen mit der Rechnung $\{9\}$, die die Absorptionswahrscheinlichkeit liefert. Eine Zufallszahl und die daraus resultierende Entscheidung zur Absorption oder Transmission werden ausgegeben. So entsteht ein Fließschema aus Rechenschritten, die im Wesentlichen dem Programmcode entsprechen, nachvollziehbar für den Lernenden. In einem anderen, eher projektartigen Rahmen könnte man mit Interessierten alternativ den tatsächlichen Arduino-Code untersuchen. Die benutzerfreundliche open-source Oberfläche ermöglicht es, ohne Programmierkenntnisse, die Funktionsweise bis in Detail nachzuvollziehen. Es wird somit jeder Schritt, der dazu nötig ist, die quantenphysikalischen Ergebnisse auszugeben, offengelegt.

Trotzdem bleiben wichtige Eigenschaften der Quantenphysik für die Lernenden weiterhin erhalten:

- Quantenobjekte sind unteilbar (wie hier die Chips), werden als einzelnes Quantenobjekt entweder ganz absorbiert (und verschwinden aus dem Aufbau) oder als Ganzes durchgelassen.
- Führt man den Versuch mit vielen Chips durch, ergibt sich eine Verteilung, die dem Gesetz von Malus entspricht, jedoch stochastische Fluktuationen aufweist.
- Für das einzelne Photon ist keine Vorhersage des Verhaltens möglich, es sei denn, man hat dessen Zustand spezifisch präpariert.

Selbstverständlich muss man bei diesem Aufbau auch Abstriche machen, da es sich um eine Analogie handelt, deren Modellcharakter die Ergebnisse der Quantenphysik makroskopisch nachbildet: So muss der NFC-Chip im Gehäuse des Polfiltermoduls einen Weg gehen, um an der einen oder anderen Stelle ausgegeben zu werden. Dieser Weg ist einsehbar – ein Prinzip, das dem Verhalten von Quantenobjekten widersprechen würde.

Wie schon in der Einleitung erwähnt, ist auch dieser Aufbau nur eine Repräsentation der Grundlagen der Quantenphysik, die ihre Vor- und Nachteile hat. Aufgrund seiner Einfachheit bietet es sich an, ihn in Kombination mit anderen Repräsentationen einzusetzen. Dies kann z.B. das reale Experiment mit klassischem Licht sein, indem man die Intensität am Ausgang hinter mehreren Polfiltern entweder auf einem Schirm auftreffen lässt und mit dem Auge abschätzt oder mit einer Fotodiode ausmisst.

5. Ausblick

Es stellte sich heraus, dass der Aufbau mit 3D-Druck und Microcontroller-Steuerung vielseitige Möglichkeiten bietet, die nun darauf warten, in realen Unterrichtssituationen oder Schülerlaboren getestet zu werden. Parallel dazu werden die vorhandenen Module aber auch weiterentwickelt, um so weitere quantenoptische Experimente nachzustellen. Dieses Projekt wird in weiteren Schritten dann auf die Erfahrungen mit Schulklassen im Schülerlabor aufbauen und es Lehrkräften ermöglichen, die Materialien im eigenen Unterricht einzusetzen.

6. Literatur

- [1] Kultusministerkonferenz (2020): Bildungsstandards im Fach Physik für die Allgemeine Hochschulreife. URL.: https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2020/2020_06_18-BildungsstandardsAHR_Physik.pdf (Stand 6/2022)
- [2] Küblbeck, J.; Müller, R. (2002): Die Wesenszüge der Quantenphysik: Modelle, Bilder und Experimente. Aulis-Verlag Deubner & Co. KG, Köln
- [3] Küblbeck, J. (2000): Der Quantenradierer: Ein einfaches Experiment mit Polarisationsfiltern am Doppelspalt für den Physikunterricht. In: Praxis der Naturwissenschaften Physik, Heft 8/49, Aulis Verlag Deubner & Co. KG, Köln; Lotze, K.-H. (Hrsg.)
- [4] Pospiech, G. (2021): Quantencomputer & Co.: Grundideen und zentrale Begriffe der Quanteninformation verständlich erklärt. Springer Spektrum Wiesbaden. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-30445-4>
- [5] Heusler, S.; Schlummer, P.; Ubben, M. (2021): The Topological Origin of Quantum Randomness. Symmetry, 13(4):581. DOI: <https://www.mdpi.com/2073-8994/13/4/581>

- [6] Aehle, S.; Cartarius, H. (2021): Didaktische Ansätze für Quantum Random Number Generators (QRNG). In: *PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung Bonn*; Grötzebauch, H. (Eds.)
- [7] Bitzenbauer, P.; Meyn, J. (2020): A new teaching concept on quantum physics in secondary schools. In: *Physics Education* 55(5) 055031
- [8] Scheiger, P.; Nawrodt, R.; Cartarius, H. (2020): Interaktive und aktivierende Lehrkonzepte in der Theoretischen Physik. In: *PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung Bonn*; Nordmeier, V.; Grötzebauch, H. (Eds.)
- [9] Filk, T. (2019): *Quantenmechanik (nicht nur) für Lehramtsstudierende*. Springer Spektrum, Berlin.
- [10] Pospiech, G.; Schöne, M. (2020): Teacher Education in Quantum Physics – A Proposal for Improving Content Knowledge. In: *ESERA'19 – Conference Proceedings*, 1452
- [11] Greinert, F.; Müller, R.; Bitzenbauer, P.; Ubben, M.; Weber, K.-A. (2021) Ermittlung von Anforderungen an künftige Quanten-Fachkräfte: Zwischenbericht aus der Delphi-Studie. In: *PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung Bonn*; Grötzebauch, H. (Eds.)
- [12] Weber, K.-A.; Friege, G.; Scholz, R. (2020): Quantenphysik in der Schule – Was benötigen Lehrkräfte? Ergebnisse einer Delphi-Studie. In: *ZfDN* 26, 173–190. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40573-020-00119-6>
- [13] Ivanjek, L.; Shaffer, P.; Planinic, M.; McDermott, L. (2020): Probing student understanding of spectra through the use of a typical experiment used in teaching introductory modern physics, *Physical Review Special Topic - Physics Education Research*. Vol. 16, Iss. 1., 010102, DOI: <https://journals.aps.org/prper/abstract/10.1103/PhysRevPhysEducRes.16.010102>
- [14] Greinert, F.; Müller, R. (2021): Playing with a Quantum Computer. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.06271>
- [15] Schlummer, P.; Laustöer, J.; Schulz-Schaeffer, R.; Abazi, A.; Schuck C.; Pernice, W.; Heusler, S.; Laumann, D. (2020): MiReQu - Mixed Reality Lernumgebungen zur Förderung fachlicher Kompetenzentwicklung in den Quantentechnologien. In: *PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung Bonn*; Grötzebauch, H. (Eds.)
- [16] Donhauser, A.; Bitzenbauer, P.; Meyn, J.-P. (2020): Von Schnee- und Elektronenlawinen: Entwicklung eines Erklärvideos zu Einzelphotonendetektoren. In: *PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung Bonn*; Grötzebauch, H. (Eds.)
- [17] Grabau, M. (1938): Polarized Light Enters the World of Everyday Life. In: *Journal of Applied Physics* 9, 215 (1938); DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1710411>