

Praxisorientiertes Fortbildungskonzept mit Selbstlernseinheiten zur Quantenphysik

- Fokus auf die Wesenszüge der Quantenphysik und Analogiemodelle -

Stefan Aehle*, Kim Kappl[†], Philipp Scheiger⁺

*Friedrich-Schiller-Universität Jena, August-Bebel-Straße 4, 07743 Jena [†]Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 57, 70569 Stuttgart
stefan.aehle@uni-jena.de

Kurzfassung

Vertiefend zum vorgestellten Fortbildungskonzept [1] steht in diesem Artikel die Umsetzung der Erarbeitung der Wesenszüge der Quantenphysik, die über interaktive Selbstlernmodule kombiniert mit schulpraktischen Experimenten sowie Analogiemodellen vermittelt werden. Die hybride Herangehensweise mit digitalen Lerneinheiten und praxisnahen Präsenzphasen erlaubt es den Teilnehmenden ihren Lernprozess flexibel selbstzusteuern. Erste Rückmeldungen zeigen hohe Akzeptanz bei Lernenden; Lehrkräfte profitieren besonders von der Verzahnung vertrauter Inhalte mit neuen didaktischen Zugängen. Der multiperspektivische Ansatz stärkt konzeptionelles Verständnis und eröffnet vielfältige Zugänge zum komplexen Thema Quantenphysik. Weitere Vertiefungen zum Fortbildungskonzept finden sich in zusätzlichen Veröffentlichungen [2, 3].

1. Motivation

Seit der Aktualisierung der KMK-Bildungsstandards 2020 [4] und der daraus folgenden sukzessiven Anpassung der Lehr- und Bildungspläne der Länder, ist der Bedarf an Lehrerfortbildungen und praxisnahen Unterrichtsmaterialien für den Quantenphysikunterricht groß. Eine Herausforderung für viele Lehrkräfte ist es dabei nicht nur methodisch vielfältigen Fachunterricht zu geben, sondern vor allem die Fachinhalte selbst aufzufrischen, denn für viele gehörte Quantenphysik nicht zu Ausbildung. Mit dem Ziel, Lehrende möglichst effektiv auf das eigene Unterrichten vorzubereiten und ihnen dabei eine Fülle an geeignetem Material an die Hand zu geben, entsteht in Kooperation der Physikdidaktiken der Universität Stuttgart und Friedrich-Schiller-Universität Jena und Unterstützung vieler Weiterer, ein Fortbildungsangebot mit Selbstlernseinheiten. Dieses bietet Lehrkräften die Möglichkeit, sich räumlich und zeitlich weitgehend selbstständig mit den komplexen Inhalten der Quantenphysik auseinanderzusetzen, Feedback einzubringen, und in Austausch zu treten. Dabei wird das online-Format eines Moodle-Kurses durch Konsultationstermine in Präsenz unterstützt, zu denen neben inhaltlichen Diskussionen auch klassisch-optische Experimente, Analogieverweise, und quantenphysikalische Realexperimente vorgestellt werden.

2. Die Wesenszüge der Quantenphysik als zentrale Fachinhalte

Das Lehrkonzept der Wesenszüge der Quantenphysik nach Rainer Müller und Josef Küblbeck, das Anfang der 2000er Jahre entwickelt und seither in verschiedenen Kontexten evaluiert wurde, ist inzwischen im Bereich der Quantenphysikdidaktik so weit verbreitet, dass es sich in die KMK-

Bildungsstandards von 2020 und folglich in allen Curricula der Bundesländer wiederfindet [5]. Während einige Lehr- und Bildungspläne die Inhalte nur wortgleich wiedergeben, werden sie in anderen auch tatsächlich als Wesenszüge benannt – auch, wenn der Verweis auf das zugrundeliegende Lehrkonzept oft fehlt:

- Stochastische Vorhersagbarkeit
- Eindeutigkeit der Messergebnisse
- Fähigkeit zur Interferenz
- Komplementarität

Aufgrund ihrer wichtigen Stellung im Quantenphysikunterricht, wird den Wesenszüge im hier vorgestellten Fortbildungskonzept ebenfalls ein zentraler Platz gewidmet. Im gleichnamigen Kurs Q2 befinden sich dazu vier Einheiten zu den entsprechenden Inhalten der Vorlage. Die ursprünglichen Inhalte selbst sind bereits in verschiedenen Formaten, von den Autoren aufgearbeitet wurden. So finden sich auf einer zentralen Homepage [6] zum Beispiel Handreichungen und unterstützende Materialien wie Arbeitsblätter und Simulationen. Da diese Materialien inzwischen aber teils veraltet sind und auch nicht an jeden Vorkenntnissen anknüpfen, wird im Fortbildungsangebot vieles aktualisiert und angepasst. So bieten die interaktiven H5P-Dateien die Möglichkeit, selbstgesteuert zu lernen und sich die Wesenszüge im eigenen Tempo anzueignen. Außerdem wird Hauptfokus auf die Verknüpfung mit Experimenten und Unterrichtspraxis gelegt. So bieten moderne Lehrmittel und Materialien auch Möglichkeiten, die in der Konzeptionsphase der Wesenszüge noch nicht existierten (3D-Druck-Modelle, moderne Simulationen). Zusätzlich besteht immer auch der Anspruch, den Lehrkräften ein Weiterbildungsangebot zu machen,

was über das unterrichtsrelevante Grundwissen hinausgeht, spezielle Themen vertieft und Anknüpfungspunkte für den eigenen Unterricht schafft. Aus diesem Grund werden die Wesenszüge im Rahmen der Fortbildung auch mit aktuellen Realexperimenten der Quantenoptik unterstützt, um Einblick in den Stand der Forschung auf diesem Gebiet zu gewähren.

3. Kombination von Analogiemodellen und klassisch-optischen Versuchen

Um Lehrinheiten zu den Wesenszügen der Quantenphysik gezielt mit Anschauungsmaterial unterstützen zu können ist im Rahmen früherer Projekte ein Analogiemodell entwickelt wurden [7, 8]. Dieses versucht die quantenphysikalischen Phänomene, die durch die Wesenszüge beschrieben werden, mit einfachen makroskopischen Elementen greifbar zu machen. Die technische Umsetzung basiert auf NFC-Chips, Arduino-Microcontrollern und einfacher Elektronik, alles umhaut von einer 3D-gedruckten Blackbox (s. Abbildung 1).



Abb. 1: Analogiemodell zu den Wesenszügen der Quantenphysik. Runde NFC-Chips (Photonen) werden in die Blackbox (Polarisationsfilter) eingeworfen. Ein auf ihnen gespeicherter Wert (Polarisationszustand) wird mit dem am Filter eingestellten Wert (Transmissionsrichtung) verglichen. Der Microcontroller im Gehäuse entscheidet nach dem Gesetz von Malus, ob der Chip hinten (Absorption) oder unten (Transmission) ausgegeben wird und gibt diesem die Einstellung des Filters mit (Polarisation). Werden mehrere dieser Boxen übereinander gestapelt lassen sich so modellhafte Versuche zur Stochastischen Vorhersagbarkeit und Eindeutigkeit der Messergebnisse realisieren. [Eigene Abbildung]

Das Modell erlaubt eine grundlegende Mathematisierung des sonst eher phänomenologisch orientierten Quantenphysikunterrichts in dem hier Messergebnisse ausgezählt, Statistiken erstellt und Transmissionswahrscheinlichkeiten für einzelne Photonen berechnet werden können. Die Lernenden erkennen, dass Messungen für einzelne Quantenobjekte vom Zufall bestimmt sind (Absorption oder Transmission des Photons), aber sich in der Statistik gewisse Muster erkennen lassen. So zeigt sich, dass der gleiche \cos^2 -Zusammenhang, der die Winkelabhängigkeit im

Gesetz von Malus bestimmt und aus klassischen Polarisationsversuchen bekannt ist, natürlich auch als Transmissionswahrscheinlichkeit für das einzelne Photon vorliegt. Sowohl im Unterrichtsverlauf mit Schülerinnen und Schülern als auch zum Präsenztermin der Lehrerfortbildung, wird dieses Analogiemodell mit Freihandpolarisationsversuchen und Experimenten zum Gesetz von Malus gepaart, um den Perspektivenwechsel von makroskopischer zu mikroskopischer Ebene herauszuarbeiten. Damit müssen diese Teile der Wesenszüge nicht axiomatisch präsentiert werden, sondern können stückweise selbstständig erarbeitet werden. Während das Material so ausgelegt ist, dass es im schulischen Kontext mit Arbeitsblättern und Aufgabenstellungen zur Anwendung kommen kann, ermöglichen die erweiterten Rahmenbedingungen im universitären Kontext auch, dass die Ergebnisse mit quantenphysikalischen Realexperimenten unterstützt werden. Konkret heißt das, dass neben den klassischen Versuchen und Analogiemodellen auch Einzelphotonenexperimente im Schülerlabor angeboten werden, die eine weiter Perspektive eröffnen: Die Ebene der Modellhaftigkeit wird verlassen und reale Messergebnisse aufgenommen, die es zu interpretieren gilt. Zählraten am Hanbury-Brown-Twiss-Aufbau werden ausgewertet und führen (meist) zu dem Schluss, dass einzelne Photon sich tatsächlich nicht aufteilt, sondern nur eine der klassisch-denkbaren Möglichkeiten realisiert – auch wenn Fehlerquoten und technisches Rauschen diskutiert werden müssen. Da sich die theoretischen Grundlagen der Wesenszüge der Quantenphysik an dieser Stelle so gut mit klassischen Versuchen, Analogien und modernen Experimenten verbinden lassen, bietet es sich nur an, auch für Lehr- und Fortbildungsszenarien den Einstieg über die Polarisation von Licht zu wählen. Dementsprechend gibt es auch im Moodle-Raum einen Fokus auf diese Herangehensweise (s. Abbildung 2) bevor anschließend andere Kontexte erörtert werden.

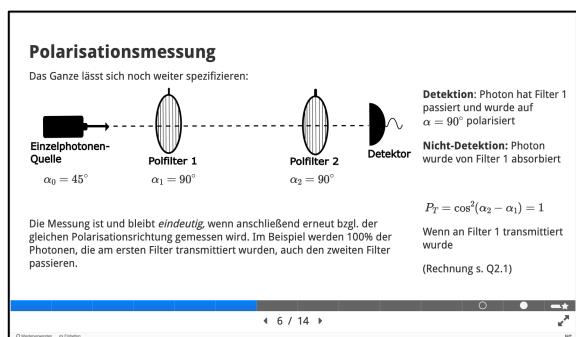


Abb. 2: Beispiel aus der interaktiven Lernumgebung des Moodle-Kurses zur Lehrerfortbildung. Die Wesenszüge der Quantenphysik werden vorerst über die Polarisation von Photonen behandelt, um die Inhalte anschließend mit schulpraktischen Experimenten zu unterstützen. Im späteren Verlauf wird die Thematik vertieft und auch andere Kontexte übertragen. [Eigene Abbildung]

Auch die Wesenszüge Fähigkeit zur Interferenz und Komplementarität werden durch eine Kombination von klassisch-optischen Versuchen und Analogiemodellen eingeführt, bevor die Ergebnisse mit quantenphysikalischen Realexperimenten belegt werden. Das Analogiemodell basiert auf der gleichen Plattform wie für die übrigen Versuche, wird nun jedoch anders präsentiert. Eine einzelne Blackbox steht nun stellvertretend für einen gesamten Interferenzaufbau (Doppelspalt, Michelson-, oder Mach-Zehnder-Interferometer). Im Rahmen der Wesenszüge stellt sich für das einzelne Photon im Interferometer die Frage nach der Verfügbarkeit verschiedener klassisch-denkbare Möglichkeiten, sprich verschiedener „Wege“ von der Quelle bis zum Detektor oder Schirm. Befinden sich in den zwei Strahlengängen beispielsweise zwei gleich ausgerichtete Polarisationsfilter (Differenzwinkel 0°), stehen dem Photon beide Wege ungehindert zur Verfügung – egal in welchen Polarisationszustand es sich befindet. Die Häufigkeitsverteilung wird ein Interferenzmuster ergeben, oder bezogen auf das einzelne Quantenobjekt: Das Photon „trägt zum Interferenzmuster bei“ (Abbildung 3).

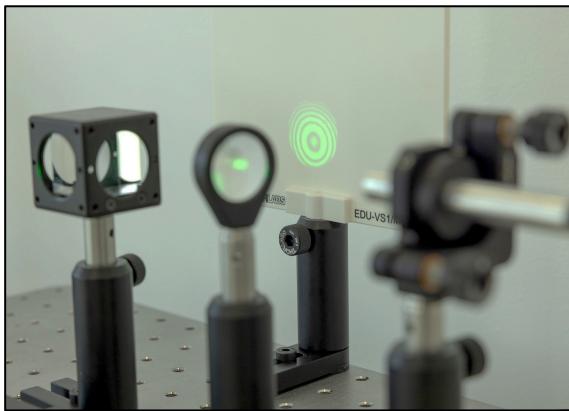


Abb. 3: Interferenz im Michelson-Interferometer. Im Rahmen der Erarbeitung der Wesenszüge Fähigkeit zur Interferenz und Komplementarität werden neben den Analogiemodellen auch hochwertige optische Komponenten genutzt, um experimentelle Feinheiten zu thematisieren. Die Lernenden bekommen somit die Möglichkeit, die eigene methodische Fähigkeiten auszubauen, während Fachinhalte mit anschaulichen Versuchen kombiniert werden. [Eigene Abbildung]

Ein weiterer Spezialfall ergibt sich, wenn eine eindeutige Wegunterscheidbarkeit in den Aufbau gebracht wird, indem beispielsweise einer der beiden Filter orthogonal zum anderen ausgerichtet wird (Differenzwinkel 90°). Das Photon hat damit immer nur eine klassisch-denkbare Möglichkeit den Aufbau zu durchlaufen, denn das Photon, was den 0° -Filter durchlaufen hat, kann auf keinen Fall den 90° -Filter durchlaufen haben und umgekehrt (Absorptionswahrscheinlichkeit 100%). Während man am Doppelspalt mit Polarisationsfiltern für diesen Fall ein Einzelspaltmuster erhalten würde, zeigt sich auch im Interferometer keine Interferenz. Auf das einzelne Photon

übertragen lässt sich sagen, dass es „nicht zum Interferenzmuster beiträgt“. Das Analogiemodell greift nun genau diese Ergebnisse auf: zwei Drehregler erlauben das Einstellen verschiedener Winkelkombinationen von gedachten Polarisationsfiltern in den Strahlengängen, der sich ergebende Differenzwinkel beeinflusst die Messung, und die Messung gibt zwei Möglichkeiten für das Photon. Entweder es „trägt zum Interferenzmuster bei“ (unterer Ausgang) oder es „trägt nicht zum Interferenzmuster bei“ (hinterer Ausgang). Interessant sind nur vor allem wenige Spezialfälle. Neben den beiden oben besprochenen Fällen, in denen 100% der eingegebenen NFC-Chips aus einem der beiden Ausgänge kommen, wäre auch noch ein 50/50-Fall eindeutig bestimmbar und damit prädestiniert zur Diskussion. Dieser ergibt sich bei einer Winkeldifferenz von 45° , sodass die nur die Hälfte der Photonen zum Interferenzmuster beiträgt. Optisch ergibt sich im klassischen Aufbau dann ein kontrastärmeres Interferenzbild, quasi eine Überlagerung beider Spezialfälle. Alle weiteren Winkelkombinationen sind im Rahmen der Versuchsreihen mit Lehrkräften, Schülerinnen und Schülern nicht zwingend zu diskutieren, da sie sich sowohl im Experiment als auch im Modell nur undeutlich abzeichnen. Allerdings lassen sich die Aufbauten noch um einen weiteren Polarisationsfilter vor der Detektionsebene erweitern, um so auch den „Quantenradierer“ zu besprechen [9]. Insbesondere die Erarbeitung des Wesenzugs der Komplementarität und der Frage nach der Welche-Weg-Information werden dadurch bereichert.

Da sich die Diskussion der Wesenszüge und der Wissenstransfer von makroskopischem auch mikroskopischen Kontext oft als Herausforderung darstellt, wird an dieser Stelle auch oft auf die Unterstützung von digitalen Simulationen zurückgegriffen, wie sie bereit in verschiedenen Formen existieren [10, 11]. Diese haben gegenüber klassisch-optischen, Analogie- und quantenphysikalischen Realexperimenten den Vorteil, dass sie sich beliebig starten und stoppen lassen, und damit Interferenzverteilung Stück für Stück erkennbar machen, ohne, dass Zählraten interpretiert werden müssen.

4. Bisherige Erprobungen und Schlussfolgerungen aus dem Multiperspektiven Ansatz

Erst die Kombination aus qualitativen und quantitativen Methoden vervollständigt das Bild. Das zeigte sich sowohl in der Konzeptionsphase der Analogiemodelle als auch in nachfolgenden Fortbildungsveranstaltungen mit Lehrkräften. Allerdings bestand ein wesentlicher Unterschied in der Akzeptanz der Fachinhalte zwischen Schülerinnen und Schülern und ihren Lehrkräften:

Lehrkräften fiel es häufig schwer, sich im Rahmen von Weiterbildungsangeboten auf die konzeptionelle Herangehensweise der Wesenszüge an die Quantenphysik einzulassen. Viele waren es gewohnt, dass einen traditionellen, historischen Ansatz zu verfolgen, der sich hauptsächlich an Versuchen orientiert, wie

man heute eher der Atomphysik zuordnen würde (Compton-Effekt, Franck-Hertz, Spektralanalyse). Zusätzlich belastet die Lehrenden der Wechsel in der Aufgabenkultur, weg von klassischen Rechenaufgaben, hin zu verständnisorientierten, vielleicht sogar ergebnisoffenen Aufgabenstellungen (Vgl. Operatoren: Interpretiere, Bewerte). Das hier vorgestellte Fortbildungskonzept und dessen methodische Ausrichtung versucht den Lehrkräften in diesem Sinne entgegenzukommen: Es knüpft an, an bereits bekannte Fachinhalte und zeigt, wie diese mit der „neuen“, konzeptionellen Quantenphysik verknüpft werden können, beispielsweise vom Fotoeffekt, über Koinzidenzmethode zum Nachweiseinzelner Photonen, hin zu den Wesenszügen. Gleichzeitig werden Aufgabentypen so gewählt, dass auch die so beliebten Rechenaufgaben einen Platz erhalten. Die Mathematisierung und Verknüpfung mit der Stochastik bietet oft die Gelegenheit, Methodenvielfalt einfließen zu lassen. Des Weiteren ist auch die Orientierung an schulpraktischen Experimenten und das Erarbeiten von anpassbaren Unterrichtsmaterialien eine Möglichkeit, Lehrkräfte für die neuen Lehrplaninhalte zu begeistern. Dabei hat sich gezeigt, dass Bauanleitungen für Do-It-Yourself- und Low-Cost-Experimente oft mehr Anklang finden als teure Laborexperimente. Nichtsdestotrotz werden auch alle Angebote geschätzt, die es Lehrkräften und ihren Schulklassen erlauben, die Materialien, die nicht schultauglich sind, hautnah im universitären Umfeld zu erfahren.

Die Schülerinnen und Schüler selbst, die sich nun dem „neuen“ Quantenphysikunterricht ausgesetzt sahen, begegneten den Inhalten oft mit weniger Skepsis als ihre Lehrenden. Sowohl im Schülerlabor als auch in zahlreichen Unterrichtsversuchen, konnten sie sich schnell auf die unterschiedlichen Herangehensweisen einlassen und Vorurteile, dass Quantenphysik etwas „Unbegreifliches“ sei, ablegen.

Zusammenfassen hat sich gezeigt, dass der Multiperspektive Ansatz, sowohl fachlich in der Verknüpfung von Wellen- und Quantenoptik als auch methodisch in der Kombination verschiedener experimenteller Perspektiven (klassisch-optische Versuche, Analogiemodelle, quantenphysikalische Realexperimente), den Lernenden unterschiedliche Wege bot, in das Thema einzusteigen. Die Erarbeitung verschiedener Blickwinkel, oft im Blended-Learning-Format, erlaubte es den Lernenden ihren eigenen Zugang zu wählen und so individuelle Lernfortschritte zu verzeichnen.

5. Literatur

- [1] Aehle, S.; Kappl, K.; Scheiger, P. (2025): Praxisorientiertes Fortbildungskonzept mit Selbstlernerinheiten zur Quantenphysik. In: PhyDid B, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, 1 (2025)
- [2] Scheiger, P.; Kappl, K.; Aehle, S. (2025): Praxisorientiertes Fortbildungskonzept mit Selbstlernerinheiten zur Quantenphysik – Fokus auf Verschränkung und das quantenmechanische

Weltbild. In: PhyDid B, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, 1 (2025)

- [3] Kappl, K.; Aehle, S.; Scheiger, P. (2025): Praxisorientiertes Fortbildungskonzept mit Selbstlernerinheiten zur Quantenphysik - Fokus auf dem Nachweis der Quantennatur des Lichts und der Erzeugung einzelner Photonen - In: PhyDid B, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, 1 (2025)
- [4] Bildungsstandards im Fach Physik für die allgemeine Hochschulreife. Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 18.06.2020: https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/2020/2020_06_18-BildungsstandardsAHR_Physik.pdf (Stand: 4/2025)
- [5] Kühlbeck, J.; Müller, R. (2002): Die Wesenszüge der Quantenphysik: Modelle, Bilder und Experimente. Aulis-Verlag Deubner & Co. KG, Köln
- [6] milq und die Wesenszüge der Quantenphysik. Url: <https://www.milq.info/milq-und-die-wesenszuege-der-quantenphysik/> (Stand: 4/2025)
- [7] Aehle, Stefan; Scheiger, Philipp; Cartarius, Holger (2022) An Approach to Quantum Physics Teaching through Analog Experiments. In: Physics (2022), Url: <https://www.mdpi.com/2624-8174/4/4/80> (Stand: 5/2025)
- [8] Aehle, S.; Cartarius, H.: Entwicklung von Analogie-Experimenten zum quantenmechanischen Messprozess. In: PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur virtuellen DPG-Frühjahrstagung (2022), Grötzebauch, H. & Heinicke S. (Hrsg.), S.419-424.
- [9] Kühlbeck, 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.)
- [10] Simulationsprogramm zum Mach-Zehnder-Interferometer der milq-Website, Universität Braunschweig, Url: <https://www.milq.info/MZ/index.html> (Stand 05/2025)
- [11] Simulationsprogramm zum Mach-Zehnder-Interferometer von MINTapps, Kippenberg, Url: <https://mintapps.org/html/mint-machzehnder.html> (Stand 05/2025)

Danksagung

Besonderer Dank gilt dem Stifterverband der deutschen Wissenschaft e.V. der im Rahmen der Quantum-Skills-Initiative das standortübergreifende Projekt der Lehrfortbildung durch seine QuBit-Fellowships für einen zeitgemäßen Quantenunterricht fördert.