

Praxisorientiertes Fortbildungskonzept mit Selbstlernseinheiten zur Quantenphysik

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

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

Kurzfassung

Mit der Einführung neuer Bildungsstandards der KMK für die gymnasiale Oberstufe sind Themen der Quanten- und Atomphysik stärker in den Fokus des Physikunterrichts gerückt. Viele Lehrkräfte sehen sich dabei fachlich wie didaktisch herausgefordert. Um diesen Bedarf aufzugreifen, wurde ein praxisorientiertes Fortbildungskonzept im Blended-Learning-Format entwickelt. Herzstück ist ein strukturierter Moodle-Kurs mit interaktiven Selbstlernseinheiten, ergänzt durch Live-Online-Sitzungen und eine abschließende Präsenzveranstaltung. Die Inhalte orientieren sich an den aktuellen Standards und wurden in Pilotphasen mit Lehrkräften erprobt. Erste Rückmeldungen zeigen ein hohes Maß an Akzeptanz für das flexible und adaptive Fortbildungsformat.

1. Motivation

Mit den neuen Bildungsstandards der Kultusministerkonferenz (KMK) aus dem Jahr 2020 [1] wurden bestimmte Fachinhalte in der gymnasialen Kursstufe der allgemeinen Hochschulreife für alle Bundesländer verbindlich festgelegt. Dabei wurden im Themenbereich „Quantenphysik und Materie“ einige Inhalte implementiert, welche in den wenigsten Lehrplänen der Bundesländer bisher verankert waren, so beispielsweise das quantenmechanische Weltbild hinsichtlich der Begriffe Realität, Lokalität, Kausalität und Determinismus oder aber auch die Koinzidenzmethode zum Nachweis einzelner Photonen.

Des Weiteren ist der konzeptionelle Zugang in die Quantenphysik über die sogenannten „Wesenszüge der Quantenphysik“ nach Rainer Müller und Joseph Küblbeck [2] vielen Lehrkräften immer noch nicht bekannt und wenn sie ihn kennen, gibt es kaum systematische Umsetzungen der fachdidaktischen Innovationen in die konkrete Unterrichtssituation [3]. Dagegen ist der historische Zugang in die Quantenphysik über das Planck'sche Strahlungsgesetz und die Deutung des fotoelektrischen Effekts unter Physiklehrkräften noch sehr verbreitet.

Außerdem mussten Themen aus dem Bereich der Atomphysik, wie beispielsweise der eindimensionale Potentialtopf, in einigen Bundesländern in den letzten Jahren nicht verbindlich unterrichtet werden, halten jetzt aber durch die Implementation der KMK-Bildungsstandards Einzug in die neuen Bildungs- und Lehrpläne.

Aufgrund der hier angeführten Punkte besteht bei vielen Lehrkräften in ganz Deutschland ein hoher Bedarf nicht nur an fachdidaktischen, sondern auch an inhaltlichen Fortbildungen im Bereich der Quanten- und Atomphysik. Um diesem Bedarf an

Fortbildungen gerecht zu werden, entwickeln die AG Fachdidaktik der Physik und Astronomie der Friedrich-Schiller-Universität Jena und die AG Physik und ihre Didaktik der Universität Stuttgart in Kooperation ein Fortbildungskonzept im Blended-Learning-Ansatz.

Im Verlauf dieses Artikels wird eben dieses Fortbildungskonzept, sowie die konkrete Umsetzung genauer beleuchtet. Abschnitt 2 beschreibt das Fortbildungskonzept, Abschnitt 3 den online Selbstlernkurs und Abschnitt 4 eine abschließende Präsenzveranstaltung. In Abschnitt 5 werden erste Erkenntnisse aus Probeläufen beschrieben und die Schlussfolgerungen, die daraus gezogen werden können. Weitere Publikationen gehen exemplarisch fachlich und fachdidaktisch ins Detail [4-6].

2. Das Fortbildungskonzept

Die Fortbildung besteht zu einem großen Teil aus einem Online-Selbststudium. Hierfür wurde ein Moodle-Kurs entwickelt, in welchem die Lehrkräfte alle für die Fortbildung relevanten Inhalte in Form von interaktiven H5P-Dateien zur Verfügung gestellt bekommen.

Nachdem die Lehrkräfte Zugang zum Moodle-Kurs erhalten haben, wird ihnen ein gewisser Zeitraum genannt (ca. drei bis vier Wochen), innerhalb dessen sie sich ein vorher abgestimmtes Thema im Selbststudium erarbeiten sollen. Nach Ablauf des vorgegebenen Zeitraums wird eben dieses Thema in einer Live-Online-Sitzung durch die Dozierenden nochmals erklärt und Zeit für aufkommende Fragen eingeräumt. Des Weiteren dient die Online-Sitzung als Einladung zur Diskussion über die Einbettung des jeweiligen Fachinhalts in den praxisorientierten Unterricht.

Am Ende der Online-Sitzung wird den Lehrkräften ein neues inhaltliches Thema genannt, welches sie sich innerhalb eines neu vorgegebenen Zeitraums

(erneut ca. drei bis vier Wochen) mithilfe der im Moodle-Kurs zur Verfügung gestellten H5P-Dateien erarbeiten sollen. Am Ende des zweiten Zeitraums findet erneut eine Live-Online-Sitzung statt, um Fragen der neuen fachlichen Inhalte im Plenum zu klären.

Dieser Modus wiederholt sich iterativ so lange, bis die für die Lehrkräfte relevanten Inhalte durchgearbeitet wurden. Am Ende wird zusätzlich eine Präsenzveranstaltung an einer der beiden Universitätsstandorte (Stuttgart oder Jena) angeboten, um den teilnehmenden Lehrkräften die Möglichkeit zum Austausch zu geben. Des Weiteren werden Experimente vorgestellt, welche Teil der erlernten theoretischen Fachinhalte waren.

Im folgenden Abschnitt werden die Inhalte des Online-Kurses, in welchem unter anderem die Selbstlernseinheiten zu finden sind, genauer beleuchtet.

3. Der Online-Kurs

Der gesamte Online-Kurs ist gegliedert in die Sinneinheiten

- Fachinhalte Quantenphysik,
- Fachinhalte Atomphysik und Materie,
- Unterrichtsmaterial,
- Weiterführende Links und Verweise.
- Die fachlichen Inhalte wurden dabei in Form von interaktiven H5P-Dateien aufgearbeitet. Dies ist so zu verstehen, dass innerhalb der jeweiligen H5P-Datei immer wieder kleine Zwischenfragen oder Quizze gestellt werden, um die Lernenden zu aktivieren und zum Nachdenken zu animieren. Ein Auszug einer solchen Zwischenaufgabe zur Überprüfung des Lernstands ist in Abbildung 1 am Beispiel einer Koinzidenzzählung zu sehen.

Polarisation von Einzelphotonen: Verständnisfrage

Trifft ein einzelnes Photon auf einen Polarisationsfilter besteht also die Möglichkeit, dass...

A: Es transmittiert wird und sein Polarisationszustand der Durchlassrichtung des Filters entspricht

B: Es transmittiert wird und sein Polarisationszustand nicht der Durchlassrichtung des Filters entspricht

C: Es absorbiert wird

D: Es teils transmittiert und teils absorbiert wird

Überprüfen

○ ○ ○ ○ — *

◀ 16 / 27 ▶

Abb. 1: Aktivierende Elemente fordern die Lernenden zur Interaktion auf, wie hier exemplarisch, eine Frage zur Polarisation von Einzelphotonen. So wird kann der eigene Lernfortschritt selbstständig überprüft werden. [Eigene Darstellung]

Im folgen Verlauf werden die einzelnen Rubriken des Online-Kurses genauer beleuchtet.

Der Abschnitt „Fachinhalte Quantenphysik“ ist dabei in die folgenden Einzelkurse unterteilt:

- Q1: Die Koinzidenzmethode zum Nachweis einzelner Photonen,
- Q2: Die Wesenszüge der Quantenphysik,
- Q3: Die mathematische Beschreibung der Quantenmechanik,
- Q4: Verschränkung und das quantenmechanische Weltbild hinsichtlich der Begriffe Realität, Lokalität, Kausalität und Determinismus,
- Q5: Der fotoelektrische Effekt,
- Q6: Weiterführende Inhalte.

Der Kurs orientiert sich zunächst explizit an den in den KMK-Bildungsstandards erwähnten Begriffen. Zusätzliche Inhalte, wie beispielsweise der mathematische Formalismus der Quantenmechanik oder der fotoelektrische Effekt wurden jedoch ebenfalls in den Kurs integriert, da sie einen wesentlichen Bestandteil zum vertieften Verständnis anderer Inhalte bilden. Andere nicht zu vernachlässigende Inhalte, wie beispielsweise die Heisenbergsche Unschärferelation oder Materiewellen sind im Moment in Bearbeitung und sollen im Laufe des Jahres noch in den Kurs integriert werden.

Der Abschnitt „Fachinhalte Atomphysik und Materie“ besteht aus den folgenden Einzelkursen:

- A1: Die historische Entwicklung des Atombilds,
- A2: Rutherford's Kern-Hülle-Modell,
- A3: Das Bohrsche Atommodell,
- A4: Der Weg zum quantenmechanischen Atommodell,
- A5: Das Wasserstoffatom,
- A6: Energieniveauschemata, Atomübergänge und Spektren,
- A7: Röntgenspektrum,
- A8: Mehrelektronensysteme.

Obwohl einige Inhalte aus dem Bereich der Atomphysik in den Jahren vor dem Beschluss der KMK-Bildungsstandards in einigen Lehrplänen verankert waren (vgl. beispielsweise den Thüringer Lehrplan von 2012 [7]), gibt es auch andere Bundesländer, in denen diese Inhalte in den letzten Schuljahren nicht verbindlich unterrichtet werden mussten (so beispielsweise Baden-Württemberg, siehe Bildungsplan 2016 [8]). Aus diesem Grund wurde sich dafür entschieden, eben diese Fachinhalte dennoch in den Online-Kurs zu integrieren, um ein möglichst breites Publikum an Lehrkräften aus ganz Deutschland anzusprechen.

Die Struktur des Online-Kurses aus mehreren Einzelkursen dient mehreren Zielen. In erster Linie soll dadurch ein adaptives Angebot geschaffen werden, welches die individuelle Lehrkraft genau dort abholt, wo sie gerade steht – neue und vertiefende Inhalte sind wohl attraktiver für

Lehrkräfte, welche bereits einige Erfahrung im eigenen Quantenphysikunterricht gesammelt haben. Eher grundlegende Inhalte, wie beispielsweise die Wesenszüge der Quantenphysik, eignen sich insbesondere für Anfänger, welche noch nie Quantenphysik selbst unterrichtet haben. Es steht den teilnehmenden Lehrkräften also frei, für welche Fachinhalte sie sich interessieren und zu welchen Inhalten sie sich dementsprechend weiterbilden möchten. Des Weiteren bietet das Konzept eines auf längere Zeit zugänglichen Online-Kurses den Vorteil, sich die Inhalte zu einem individuell gewählten Zeitpunkt aneignen zu können. So ist man nicht auf bestimmte feste Termine angewiesen, wie es bei den meisten Fortbildungen der Fall ist, sondern kann sich die Inhalte genau dann erarbeiten, wann Zeit dafür ist. Der Online-Kurs bietet also zusätzlich eine große zeitliche Flexibilität an, wie sie im „klassischen“ Fortbildungsformat nicht möglich wäre.

Nichtsdestotrotz dürfen neben der Bereitstellung verständlich aufgearbeiteter Fachinhalte auch konkrete Vorschläge für den eigenen Unterricht nicht fehlen. Daher sind im Abschnitt „Unterrichtsmaterialien“ vielseitige Materialien zur lizenzenfreien Nutzung im Schulunterricht zu finden. So beispielsweise Bilder, Abbildungen und Skizzen von Experimenten und physikalischen Phänomenen, Vorschläge für Tafelbilder und Übungsaufgaben, Versuchsanleitungen, etc.

Zuletzt befinden sich im Abschnitt „Weiterführende Links und Verweise“ Links zu vertiefenden Materialien zur eigenständigen Verwendung, wie beispielsweise das Glossar zu den Grundbegriffen der Quantenphysik von Filk und Fuchs der Universität Freiburg [9] oder andere fachwissenschaftliche Artikel.

Die Einzelkurse sind mit interaktiven H5P-Dateien gefüllt, sodass die Lehrkräfte bei der selbstständigen Erarbeitung der Fachinhalte zwischenzeitlich immer wieder aktiviert werden.

4. Präsenzveranstaltungen

Im Anschluss an die Selbststudienphase und die Online-Sprechstunden wird den Teilnehmenden zusätzlich ein Termin für eine Präsenzsitzung angeboten. Diese Sitzung findet an einem der beiden Universitätsstandorte Stuttgart oder Jena statt und dient mehreren Zielen:

Einerseits kann vor Ort auf die umfangreichen Universitätssammlung zurückgegriffen werden, um thematisch relevante Experimente zu präsentieren, die in den meisten Schulphysiksammlungen nicht zu finden sind – von bekannten, eher traditionellen Aufbauten aus der Wellenoptik und Atomphysik, bis hin zu modernen Versuchen der Quantenoptik aus aktueller Forschung. So werden Klassiker wie Fotoeffekt, Spektralanalyse und Elektronenbeugung durch Experimente mit Einzelphotonen ergänzt, um das häufig veraltete Fachwissen der Teilnehmenden

aufzufrischen. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf Experimenten mit Licht, da sich mit der Frage nach der Natur des Lichts modellhaft eine Brücke aus der klassischen in die moderne Physik bauen lässt. So wird mit einer Wiederholung klassischer Wellenphänomene wie der Polarisation oder der Interferenz am Doppelspalt gestartet, bevor Analogiemodelle zur Veranschaulichung von Einzelphotonenexperimenten eingesetzt werden. Zuletzt folgen Experimente mit einer echten Einzelphotonenquelle, wodurch beispielsweise die Koinzidenzmethode im Realexperiment demonstriert werden kann.

Die Lehrkräfte haben in den meisten Fällen dabei die Möglichkeit, selbst aktiv zu werden, eigene Versuche durchzuführen, und sich damit einen tieferen Einblick in die Thematik zu erarbeiten. Statt spezielle praktische Fähigkeiten (zum Beispiel die Justage eines Interferometers) vor Ort zu erlernen, um Versuche im eigenen Unterricht zu reproduzieren, zielt der Praxistermin viel stärker auf grundlegendes Verständnis ab. So erarbeiten die Lehrkräfte gemeinsam, wie Fachinhalte experimentell bestätigt werden, welche technischen Umsetzungsmöglichkeiten es gibt, und wie die Versuchsergebnisse didaktisch im Schulunterricht aufgearbeitet werden können. Unterstützung erhalten sie dabei durch die Dozierenden vor Ort, zusätzliches Lehrmaterial, und weiterführenden Quellenverweisen, die im Online-Kurs hinterlegt werden. Immer wieder wird mit den Kollegen abgeschätzt, was im Unterricht machbar ist und was nicht.

Da kostspielige Laborexperimente für eine direkte Umsetzung im Schulunterricht eher weniger interessant sind, müssen während der Präsenzveranstaltung auch Experimente und Unterrichtskonzepte vorgestellt werden, welche für die Lehrkräfte im eigenen Unterricht direkt einsetzbar sind. So bieten sich beispielsweise im Kontext der Wesenszüge der Quantenphysik die Analogieboxen der Friedrich-Schiller-Universität Jena an (s. Abb. 2) [10], die in Kombination mit klassisch-optischen Experimenten und digital verfügbaren Simulationen gut für den Unterricht geeignet sind. Darüber hinaus besteht auch das Angebot, mit der eigenen Schulkasse erneut die Universität zu besuchen und im Rahmen eines Schülerlabortermins den eigenen Unterricht mit modernen Versuchen zu ergänzen. Für einen solchen Termin fungiert die Präsenzveranstaltung gleichzeitig als fachliche Vorbereitung für die Lehrkraft.

Andererseits bieten Präsenzveranstaltungen wie diese immer auch die Möglichkeit der Vernetzung unter den Kollegen. So entsteht sowohl eine enge Feedbackloop für die wissenschaftliche Entwicklungsarbeit der beteiligen Arbeitsgruppen, die immer wieder die Inhalte der Fortbildung anpassen, als auch eine Datenbank an unterrichtspraktischen Erfahrungen, die die

Lehrenden in der Unterrichtsgestaltung unterstützt. Aus mehreren Umfragen und zahlreichen Einzelgesprächen hat sich immer wieder herausgestellt, dass das ein wesentlicher Aspekt für die Teilnahme an Lehrerfortbildungen ist.



Abb. 2: Analogiemodelle und klassisch-optische Experimente ergänzen die Online-Fortbildungsinhalte im Rahmen der Präsenzveranstaltung und veranschaulichen die komplexen Themen mit schultauglichen Versuchen, hier beispielsweise zum Wesenszug der Stochastischen Vorhersagbarkeit einzelner Quantenobjekte. [Eigene Darstellung]

5. Bisherige Erprobungen und Schlussfolgerungen

Das Fortbildungskonzept wurde bereits mehreren Lehrkräften vorgestellt und in großen Teilen erprobt. Im Verlauf vergangener Semester, in denen immer neue fachdidaktische und unterrichtspraktische Materialien zur Quantenphysik erstellt wurden, ergaben sich viele Möglichkeiten, neues Material zu erproben. Vor allem die Analogiemodelle begleitend zur Erarbeitung der Wesenszüge der Quantenphysik wurden ausführlich getestet und angepasst: in praktischen Unterrichtsversuchen, in Schülerlaborveranstaltungen, in Hands-on-Ausstellungen und auf Fortbildungen anderer Physikdidaktik-Arbeitsgruppen – immer wieder wurden die Materialien vorgestellt, Feedback eingeholt und Schlussfolgerungen zu deren Verbesserung gezogen. Diese Erkenntnisse fließen nun, in Kombination mit anderen Unterrichtsmaterialien und Fachinhalten, in die Konzeption der Lehrerfortbildung ein. Das so entstandene Gesamtpaket bietet den Lehrkräften also eine umfangreiche, ausführliche Sammlung an Inhalten, die flexibel auf die eigenen Bedürfnisse, und die der Lernenden, angepasst werden kann.

Die Lehrerfortbildung im hier vorgestellten Format wird inzwischen intensiv beworben und im ersten Durchlauf durchgeführt. Nach einer ersten Testrunde mit dem Kollegium eines einzelnen Gymnasiums und

einer zweiten Testrunde im Rahmen der 31. Tagen des mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterrichts in Thüringen, sind die Veranstaltungen der Fortbildungsreihe nun auf den offiziellen Seiten des Thüringer Instituts für Lehrerfortbildung, Lehrplanentwicklung und Medien (ThILLM) zur Teilnahme ausgeschrieben.

Im Allgemeinen lässt sich aus dem bisher gesammelten Feedback der Teilnehmenden feststellen, dass die Aufbereitung der Selbstlerneinheiten auf Basis der interaktiven H5P-Dateien auf großen Zuspruch trifft. Des Weiteren scheint das Anfangsniveau der jeweiligen Einzelkurse auch gut getroffen zu sein. Allerdings wurden die Fachinhalte im Bereich Quantenphysik von den Lehrkräften teilweise als zu schwierig und zu weit vom Schulunterricht entfernt eingeschätzt. Daraufhin wurden eben diese Themen im Moodle-Kurs so markiert, dass vor der Bearbeitung klar hervorgeht, dass bestimmte Themen lediglich zur Vertiefung gedacht sind und damit (ohne direkte Schulunterrichtsrelevanz) eher Hintergrundwissen darstellen. Auch im weiteren Verlauf der Fortbildungsreihe gilt es, die Balance zwischen fachlichem Tiefgang und Unterrichtsnähe zu finden.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Das vorgestellte Fortbildungskonzept adressiert den gestiegenen Bedarf an fundierter Fortbildung im Bereich der Quanten- und Atomphysik durch ein strukturiertes, praxisnahe Blended-Learning-Angebot. Die Kombination aus interaktiven Selbstlerneinheiten, Online-Seminaren und praxisorientierten Präsenzphasen ermöglicht eine flexible und zugleich fundierte Weiterqualifizierung von Lehrkräften. Erste Testrunden bestätigen die Relevanz und Wirksamkeit des Konzepts, wenngleich einzelne Inhalte noch stärker auf die Unterrichtspraxis abgestimmt werden müssen.

Das Fortbildungsformat wird im Laufe des Jahres 2025 im Bundesland Thüringen erstmals vollständig erprobt werden. Weitere Erprobungen sind ebenfalls in Baden-Württemberg in Planung.

Aufgrund der Zusammenarbeit mit dem Stifterverband wird der gesamte Moodle-Kurs im Herbst des Jahres 2025 auf dem MINT-Campus zu finden sein.

7. Literatur

- [1] 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)
- [2] Kühlbeck, Joseph; Müller, Rainer (2003) Die Wesenszüge der Quantenphysik: Modelle,

- Bilder, Experimente. Köln: Aulis Verlag
Duebne GmbH & Co KG
- [3] Breuer, J.; Vogelsang, C.; & Reinhold, P. (2022): Nutzungsverhalten von Lehrkräften bei der Implementierung einer physikdidaktisch innovativen Unterrichtskonzeption. *ZfDN* 28, 1.
- [4] Aehle, S.; Kappl, K.; Scheiger, P. (2025): Praxisorientiertes Fortbildungskonzept mit Selbstlernseinheiten zur Quantenphysik – Fokus auf die Wesenszüge der Quantenphysik und Analogiemodelle. In: PhyDid B, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, 1 (2025)
- [5] Kappl, K.; Aehle, S.; Scheiger, P. (2025): Praxisorientiertes Fortbildungskonzept mit Selbstlernseinheiten zur Quantenphysik - Fokus auf dem Nachweis der Quantennatur des Lichts und der Erzeugung einzelner Photonen - In: PhyDid B, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, 1 (2025)
- [6] Scheiger, P.; Kappl, K.; Aehle, S. (2025): Praxisorientiertes Fortbildungskonzept mit Selbstlernseinheiten zur Quantenphysik – Fokus auf Verschränkung und das quantenmechanische Weltbild. In: PhyDid B, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, 1 (2025)
- [7] Thüringer Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur (2012) Lehrplan Physik, Gymnasium. Url.: <https://www.schulportal-thueringen.de/media/detail?tspi=2280> (Stand 05/2025)
- [8] Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg (2016) Bildungsplan des Gymnasiums: Physik. Url: https://www.bildungsplaene-bw.de/site/bildungsplan/get/documents/lsbw/export-pdf/depot-pdf/ALLG/BP2016BW_ALLG_GYM_PH.pdf (Stand 05/2025)
- [9] Filk, Thomas (2024) Kurztexte: Quantenphysik. Url: <https://physikdidaktik.uni-freiburg.de/kurztexte/> (Stand 05/2025)
- [10] 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)

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.