

## Adaptive Lehrerfortbildung zum quantenmechanischen Weltbild

Philipp Scheiger\*, Lukas Blessing\*, Kim Kappl\*, Ronny Nawrodt\*

\*Physik und ihre Didaktik, Universität Stuttgart, 70569 Stuttgart  
p.scheiger@physik.uni-stuttgart.de

### Kurzfassung

Durch die prominente Platzierung der Quantenmechanik in den Bildungsstandards 2016 der Kultusministerkonferenz werden physikalische Inhaltsbereiche für den Schulunterricht relevant, die vorher nicht in allen Bildungs- und Lehrplänen der Länder standen. Eine Herausforderung dabei ist, dass das quantenmechanische Weltbild hinsichtlich der Begriffe Realität, Lokalität, Kausalität und Determinismus für manche Lehrkräfte nie ein Thema in den Fachvorlesungen des Studiums war. Folglich ist es im Rahmen von Lehrerfortbildungen von entscheidender Bedeutung, den Lehrkräften die Möglichkeit zu geben, sich sowohl fachlich als auch fachdidaktisch mit diesem Thema auseinanderzusetzen. Innerhalb des Verbundprojekts MINT-ProNed wird daher eine Lehrerfortbildung im Blended-Learning-Ansatz entwickelt, die das Thema auf verschiedenen Ebenen behandelt und somit adaptiv auf die individuellen Bedürfnisse der Lehrkräfte zugeschnitten werden kann. Ziel der verschiedenen Anforderungsebenen sind die Anschlussfähigkeit an bereits bestehende und gut funktionierende Lehrkonzepte wie den Wesenszügen der Quantenmechanik aus dem mlq-Konzept, die Vermittlung von vertieftem Hintergrundwissen für Lehrkräfte und die Einordnung des Nobelpreises von 2022 sowie der verschiedenen Interpretationsformen der Quantenmechanik.

### 1. Motivation

Die Behandlung des quantenmechanischen Weltbilds hinsichtlich der Begriffe Realität, Lokalität, Kausalität und des Determinismus, wie sie in den KMK Standards [1] für die gymnasiale Oberstufe gefordert werden, stellt Lehrkräfte vor eine große Herausforderung. So ist eine klare Definition dieser Begriffe ohne Vorwissen nicht einfach. Entweder ist die gemeinte Bedeutung dieser Begriffe fachlich oft nicht angemessen [2] oder die Begriffe haben in unterschiedlichen Teilgebieten der Physik unterschiedliche Bedeutungen [3]. Außerdem bilden versteckte lokale Parameter eine sehr verlockende Erklärungsalternative, die auch sehr schnell von Lernenden bei diesem Thema zur Sprache gebracht werden. Damit bei Lernenden nicht der Eindruck einer unvollständigen Quantenmechanik entsteht, müssen Lehrkräfte in der Lage sein an dieser Stelle fachlich fundiert zu argumentieren.

Zusätzlich ist die quantenmechanische Verschränkung ein wichtiger Aspekt in der Diskussion um das quantenmechanische Weltbild. Dies ist wohl einer der bekanntesten Begriffe aus der Quantenphysik, der immer wieder in populärwissenschaftlichen Artikeln und Videos aufgegriffen und behandelt wird oder aber auch für vollkommen unphysikalische oder pseudowissenschaftliche Erklärmuster herhalten muss. Mit einer soliden Lehrkräftebildung möchten wir einen Beitrag leisten, damit Lehrkräfte ihre SchülerInnen später dazu befähigen adäquat das fachliche Niveau solcher Artikel oder Videos zu bewerten.

In diesem Beitrag soll die Planung und Konzeption einer Lehrerfortbildung beschrieben werden, die im

Rahmen des Verbundprojekts MINT-ProNed für die Physik entstehen soll. In Kapitel 2 wird der Rahmen der Fortbildung in den Zielen des Projekts erläutert. Kapitel 3 beschreibt die ausgewählten Inhalte zum Thema des Quantenmechanischen Weltbilds und in Kapitel 4 wird die geplante Umsetzung beschrieben.

### 2. Rahmen der Fortbildung

Das Netzwerk Fortbildungen im Verbundprojekt MINT-ProNed zielt darauf ab, evidenzbasierte Lehrkräftefortbildungen zu entwickeln, die Lehrkräfte befähigen, digitale Technologien adaptiv im Unterricht zu nutzen. Dabei orientiert sich das Netzwerk am Orientierungsrahmen DiKoLAN (Digitale Kompetenzen für das Lehramt in den Naturwissenschaften) [4], der die notwendigen fachspezifischen und digitalen Kompetenzen für Lehrkräfte beschreibt. Die Rahmenkonzeption des Netzwerks umfasst vier Abschnitte:

- a) Identifizierung der zu fördernden SchülerInnenkompetenzen,
- b) Einsatzmöglichkeiten digitaler Unterstützung,
- c) Identifizierung erforderlicher Lehrkräftekompetenzen und
- d) Abstimmung der Fortbildungen innerhalb des Netzwerks.

Diese Struktur soll sicherstellen, dass Fortbildungen praxisnah und zielgerichtet sind, um die adaptive Förderung von SchülerInnenkompetenzen zu ermöglichen.

Um einen adaptiven Einsatz digitaler Werkzeuge und Methoden zu gewährleisten, haben die Lehrerfortbildungen die folgende Unterrichtssequenz zum Vorbild. Nach einem ersten Lernsetting erfolgt eine Diagnose des Leistungsstands der SchülerInnen, die Ausgangslage der Wahl eines zweiten Lernsettings wird. Das zweite Lernsetting wird also entsprechend der SchülerInnen Leistung gewählt. Zu allen drei Zeitpunkten kann eine digitale Anreicherung die Qualität des Unterrichts steigern.

Im Themenbereich der quantenmechanischen Verschränkung ist neben der digitalen Fortbildung auch die fachliche Fortbildung der Lehrkräfte relevant. In vielen Lehr- und Bildungsplänen wird dieses Thema neu und für die Lehrkräfte unerprobt sein. Zusätzlich kann nicht erwartet werden, dass die entsprechenden Inhalte in den universitären Fachausbildungen aller Lehrkräfte thematisiert wurden. Das bedeutet, dass die Fortbildung für Lehrkräfte mit sehr unterschiedlichem Vorwissen konzipiert werden muss.

### 3. Lernziele für SchülerInnenkompetenzen und Inhalte

Bei den Lernzielen sollte zwischen den digitalen, prozessbezogenen und den inhaltlichen Kompetenzen unterschieden werden. Diese werden daher im Folgenden separat diskutiert.

#### 3.1. Digitale, prozessbezogene Kompetenzen

Der Physikunterricht bietet sich (erwartbarer Weise) an, alle digitalen Kompetenzen, die der DiKoLAN [4] aufzählt

- Dokumentation,
- Präsentation,
- Kommunikation/Kollaboration,
- Recherche/Bewertung,
- Messwert-/Datenerfassung,
- Datenverarbeitung und
- Simulation/Modellierung,

zu adressieren und zu behandeln. Im Bereich der Quantenphysik ist dies anders, weil es ungleich schwieriger ist, eigene Messdaten echter Quantenexperimente zu generieren. Des Weiteren können die Datenmengen sehr groß und in ihrer Auswertung extrem komplex werden. Die fachspezifischen Kompetenzen (der Messwert- und Datenerfassung, der Datenverarbeitung und der Simulation und Modellierung) sind in diesem Themenkomplex also nur schwer zu vermitteln.

Durch das große populärwissenschaftliche Interesse an der Quantenphysik oder deren Zweckentfremdung (Stichwort: Quantenheilung) in digitalen Medien kann die SchülerInnen Kompetenz der Recherche und Bewertung an vielen Beispielen trainiert werden. Damit dies auf einem fachlich fundierten Niveau stattfinden kann, muss vorher der theoretische und fachliche

Input durch die Lehrkraft erfolgen. Die fachlichen Lernziele, die dafür notwendig sind, werden im folgenden Abschnitt diskutiert.

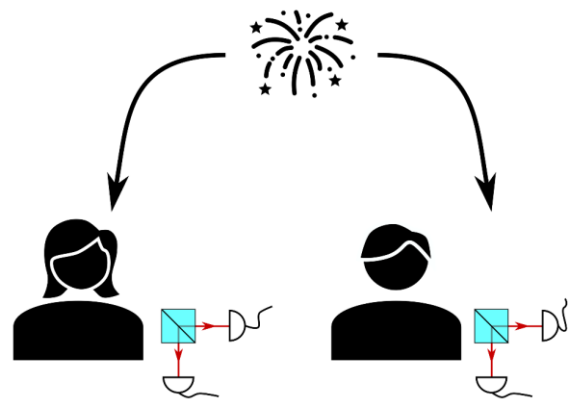
#### 3.2. Sachkompetenzen

Die inhaltsbezogenen Sachkompetenzen der SchülerInnen sind bei diesem Thema durch die KMK Standards recht eng und klar vorgegeben. Gefordert wird ein fachlicher Umgang mit dem quantenmechanischen Weltbild hinsichtlich der Begriffe Realität, Lokalität, Kausalität und Determinismus [1]. Die Begriffe der Kausalität und Lokalität können gemeinsam und in eigener Abgrenzung nur am Beispiel der Verschränkung diskutiert werden. Ein vernünftiges Lernziel für die Sachkompetenzen wäre beispielsweise der Bell Zustand von zwei polarisationsverschränkten Photonen:

$$|\psi\rangle_{\text{Bell}} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|h\rangle_1|v\rangle_2 - |v\rangle_1|h\rangle_2). \quad \{1\}$$

Ob dieser Zustand in der Dirac Notation ( $h$  steht für horizontal Polarisiert und  $v$  für vertikal) oder in einer anderen Darstellungsform besprochen wird, obliegt der Entscheidung der Lehrkraft und ist abhängig vom Mathematisierungsgrad des eigenen Unterrichts sowie dem Leistungsvermögen der SchülerInnen.

Eine Diskussion zum quantenmechanischen Weltbild kann anschließend an diesem Zustand diskutiert werden, wenn die beiden Photonen räumlich voneinander getrennt werden und zu zwei Messvorrichtungen geschickt werden, die so weit auseinander stehen, dass keine Information mit Lichtgeschwindigkeit zwischen den Messungen vom einen zum anderen gelangen kann. Eine Skizze wie in Abbildung 1 kann dies für SchülerInnen veranschaulichen. In der Regel werden die Messvorrichtungen mit zwei Forschenden assoziiert, die Alice und Bob genannt werden.



**Abb. 1:** Skizze für die räumliche Trennung zweier verschränkter Photonen, die zu Alice und Bob mit je einem Aufbau zur Bestimmung der Polarisation geschickt werden.

#### 4. Lernziele für Kompetenzen der Lehrkräfte

Da die Lehrkräfte über wesentlich mehr Vorwissen verfügen und ihr Hintergrundwissen auch weiter gefasst sein muss als das der SchülerInnen, sind die Lernziele für Lehrkräfte in allen Bereichen umfangreicher.

#### 4.1. Digitale, prozessbezogene Kompetenzen

Für die Lehrkräfte ist entscheidend, dass sie die digitalen Medien passend zu ihrem Unterricht auswählen können. Am Anfang der Einheit zum quantenmechanischen Weltbild sollte ein erstes Lernsetting für die Inhaltsvermittlung stehen. Die Lehrkräfte sollten hier über digitale Anreicherungen informiert und ermutigt werden. Dazu zählen digital unterstützte Selbstlernkurse (z.B. über Moodle), veranschaulichende Simulationen oder klassische Lehrvideos.

Nach dem ersten Lernsetting erfolgt über eine Diagnose die adaptive Zuteilung der zweiten Lern- oder Übungsphase. Diese Diagnose kann im Themenbereich der Verschränkung direkt durch die Lehrkraft erfolgen, die den bisherigen Leistungsstand und das Interesse der SchülerInnen berücksichtigt. Die Lehrkraft kann dabei durch die Methode der Peer Instruction [5] digital unterstützt werden. Durch das Abstimmverhalten vor und nach einer Peer-Diskussion, mit auf das Thema zugeschnittenen Verständnisfragen, kann der Leistungsstand der SchülerInnen objektiver ermittelt werden.

In der Phase der zweiten Lernsettings sollen die SchülerInnen verschiedene Beiträge zur quantenmechanischen Verschränkung bewerten, einordnen oder selbst neue Informationen recherchieren. Damit dies konstruktiv von statten gehen kann, müssen die Lehrkräfte selbst im Voraus Beiträge sichten und für den adaptiven Einsatz einordnen oder situativ sehr schnell in der Lage sein, die SchülerInnen bei ihrer Bewertung zu unterstützen. Positive wie negative Beispiele von digitalen Beiträgen sollten deshalb bei einer Lehrerfortbildung diskutiert werden.

#### 4.2. Sachkompetenzen

Um das quantenmechanische Weltbild hinsichtlich der Begriffe Realität, Lokalität, Kausalität und Determinismus fachlich auf einem hohen Niveau reflektieren oder diskutieren zu können, sind viele Aspekte der Quantenphysik und der Physik allgemein relevant. Darüber hinaus benötigen Lehrkräfte Hintergrundwissen zu versteckten lokalen Parametern, wie sie Einstein, Podolsky und Rosen im berühmten EPR-Paradoxon fordern [6], und dass diese keine notwendige Ergänzung der Quantenmechanik darstellen, bzw. mit den Experimenten von Clauser und Aspect widerlegt wurden [7-11] (wofür es 2022 zusammen mit Zeilinger den Physik-Nobelpreis gab). Auch von SchülerInnen werden beim Thema Verschränkung „Dinge, die wir einfach noch nicht kennen“ immer wieder aufgebracht und Lehrkräfte müssen hier adäquat reagieren können. Im Folgenden werden die Aspekte aufgezählt, die für eine umfassende Diskussion notwendig sind.

##### 4.2.1. Wesenszüge der Quantenmechanik

Die Wesenszüge der Quantenmechanik, aus dem mlq-Kurs [12], sind inzwischen zentraler Bestandteil des Physikunterrichts und werden auch in den KMK Standards [1] eingefordert. Lehrkräfte müssen hier auf einem soliden fachlichen Fundament stehen und

die Wesenszüge mit weiterführenden Begriffen wie dem Kollaps der Wellenfunktion, der Schrödinger-Gleichung und der Unschärferelation in Relation setzen können.

##### 4.2.2. Die mathematische Formulierung von Zuständen & Messungen

Während das Phänomen der Verschränkung auch ohne eine mathematische Formulierung beschrieben und in Ansätzen auch diskutiert werden kann, ist für den Ausschluss von versteckten lokalen Parametern ein Verständnis um die mathematischen Formulierungen essentiell. Der experimentelle „Beweis“ kann als solcher nur verstanden werden, wenn die Theorie dahinter in jedem Schritt nachvollziehbar ist. Ansonsten bleibt die Zählrate von Quanten nur eine Zahl auf einem Display.

Relevant wird ein Verständnis des Formalismus beispielsweise für den Fall eines Basiswechsels. Dabei stellt sich die Frage, was passiert, wenn die Orientierungen der Messungen von der Orientierung (z.B. Polarisation) der Präparation abweichen. Wünschenswert wäre darüber hinaus, wenn Lehrkräfte den Formalismus unabhängig von der physikalischen Umsetzung verstehen und so nicht nur mit verschränkten Photonen, sondern z.B. auch mit verschränkten Spinsystemen vertraut sind.

##### 4.2.3. Sprachliche Elemente

Um das Phänomen der Verschränkung und seine Auswirkungen auf unser Verständnis der Natur zu verstehen, müssen Lehrkräfte über klare Definitionen der grundlegenden Begriffe verfügen. Für ein besseres Verständnis der in den KMK Standards [1] geforderten Begriffe werden diese um die Idee einer „vollständigen Theorie“ erweitert. Problematisch ist, dass auch in fachlichen Diskussionen immer wieder Vorurteile oder unsaubere Interpretationen auftauchen (vgl. [2]). Wir empfehlen daher eng an den Definitionen von Einstein, Podolsky und Rosen aus ihrem berühmten Paper zum EPR-Paradox [6] zu bleiben, diese aber als nicht allgemein gültige Definitionen kenntlich zu machen.

##### 4.2.4. Nicht-Lokalität für zwei Quanten ohne Ungleichungen

Für den Ausschluss von versteckten lokalen Parametern sind historisch die Bell-Ungleichung [13] und die CHSH-Ungleichung [7] zu nennen. Mathematisch und physikalisch sind ihre Herleitungen aber Herausforderungen, die in der Kürze von Lehrerfortbildungen nur schwer zu meistern sind. Hardy [14] hat 1993 ein Experiment vorgeschlagen, bei dem die Nicht-Lokalität der Verschränkung mit einer einfachen Fallun-

$$\begin{aligned}
 |\Psi\rangle &= \alpha |h\rangle_1 |h\rangle_2 - \beta |v\rangle_1 |v\rangle_2 \\
 |\Psi\rangle &= N(AB |\varphi\rangle_1 |\vartheta\rangle_2 + AB |\vartheta\rangle_1 |\varphi\rangle_2 + B^2 |\vartheta\rangle_1 |\vartheta\rangle_2) \\
 |\Psi\rangle &= N(A |d_{rechts}\rangle_1 |\varphi\rangle_2 + B |d_{rechts}\rangle_1 |\vartheta\rangle_2 - A^2 A^* |d_{rechts}\rangle_1 |\varphi\rangle_2 - A^2 B |d_{links}\rangle_1 |\varphi\rangle_2) \\
 |\Psi\rangle &= N(A |\varphi\rangle_1 |d_{rechts}\rangle_2 + B |\vartheta\rangle_1 |d_{rechts}\rangle_2 - A^2 A^* |\varphi\rangle_1 |d_{rechts}\rangle_2 - A^2 B |\varphi\rangle_1 |d_{links}\rangle_2) \\
 |\Psi\rangle &= N((1 - |A|^4) |d_{rechts}\rangle_1 |d_{rechts}\rangle_2 + A^2 B A^* |d_{links}\rangle_1 |d_{rechts}\rangle_2 + A^2 A^* B |d_{rechts}\rangle_1 |d_{links}\rangle_2 \\
 &\quad - A^2 B^2 |d_{links}\rangle_1 |d_{links}\rangle_2) \\
 A &= \frac{\sqrt{\alpha\beta}}{\sqrt{1 - |\alpha\beta|}}, \quad B = \frac{|\alpha| - |\beta|}{\sqrt{1 - |\alpha\beta|}}, \quad N = \frac{1 - |\alpha\beta|}{|\alpha| - |\beta|}
 \end{aligned}$$

**Abb. 2:** Skizze für Zustand  $\{2\}$  angeben in den Basiszuständen (rot) für die Orientierung, in der Alice und Bob messen. Je nach Einstellung der Messapparaturen, links dargestellt, lassen sich so die Messkombinationen aus dem Zustand (rechts) vorhersagen. Alle Formeln rechts beschreiben dabei den selben Zustand  $\{2\}$ .  $\varphi$  und  $\vartheta$  beschreiben dabei den Winkel zwischen der vertikalen Messung und der leicht gedrehten Basis und  $d$  steht für die diagonale Basis.

terscheidung von 4 verschiedenen Messkombinationen bei zwei neuen Polarisationsrichtungen hergeleitet werden kann, vergleiche Abbildung 2. Ausgangspunkt sind zwei Quanten in einem nicht vollständig verschränkten Zustand:

$$|\psi\rangle_{\text{Hardy}} = \alpha |h\rangle_1 |v\rangle_2 - \beta |v\rangle_1 |h\rangle_2. \quad \{2\}$$

Versucht man die Messergebnisse der Quantenmechanik dieser 4 Messkombinationen mit einem unbestimmten versteckten lokalen Parameter nachzuahmen, erfolgt ein Widerspruch in den Messungen. Für die vollständige Herleitung sind lediglich eine etwas aufwendigere Vektorrechnung und die Interpretation von Messwahrscheinlichkeiten notwendig.

Dieses Experiment stellt den fachlichen Höhepunkt der Lehrerfortbildung dar. Im Anschluss können weitere Theorien, die die Verschränkung beschreiben können aber darüber hinaus nicht die relativistische Quantenmechanik wie z.B. die Bohm'sche Mechanik, mit den Lehrkräften diskutiert werden.

## 5. Aufbau der Fortbildung und Ausblick

Es ist davon auszugehen, dass die Lehrkräfte mit sehr unterschiedlichem Vorwissen zu einer solchen Fortbildung kommen. Das Angebot sollte deshalb ebenfalls adaptiv und damit an die Bedürfnisse der einzelnen Lehrkraft anpassbar sein. Deshalb ist eine Umsetzung im blended-learning Format auf der Plattform Moodle geplant, bei der die Lehrkräfte die Möglichkeit haben grundlegendere Kurse zu überspringen, wenn sie über das entsprechende Vorwissen verfügen.

Prinzipiell ist von leistungsstarken SchülerInnen ebenfalls zu erwarten, dass sie mit der Argumentation von Hardy den Widerspruch in einer Quantenmechanik mit versteckten lokalen Parametern verstehen. In wie weit dieses Experiment eventuell auch mit Hilfe von Analogieexperimenten in den Unterricht integriert werden kann soll mit den Lehrkräften bei der Fortbildung diskutiert werden.

## 6. Literatur

- [1] KMK – Ständige Konferenz der Kultusminister in der Bundesrepublik Deutschland (2020): Bildungsstandards im Fach Physik für die Allgemeine Hochschulreife: [https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen\\_beschluesse/2020/2020\\_06\\_18-BildungsstandardsAHR\\_Physik.pdf](https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2020/2020_06_18-BildungsstandardsAHR_Physik.pdf) (Stand 6/2024)
- [2] Lambare, Justo Pastor (2022): On the Meaning of Local Realism. In: Foundations of Physics, 52 (5), S. 98.1-98.15.
- [3] Julio Gea-Banacloche, (2022): Causality, determinism, and physics. In: American Journal of Physics, 90 (11), S. 809–816
- [4] Becker, Sebastian et al. (2020). DiKoLAN: Digitale Kompetenzen für das Lehramt in den Naturwissenschaften. Arbeitsgruppe Digitale Basiskompetenzen. <https://dikolan.de/> (Stand 6/2024)
- [5] Mazur, Eric (2017): Peer Instruction: Springer Berlin, Heidelberg
- [6] Einstein, Albert; Podolsky, Boris and Rosen, Nathen (1935): Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? In: Physical Review, 47 (10), S. 777–780
- [7] Clauser, John et al. (1969): Proposed Experiment to Test Local Hidden-Variable Theories. In: Physical Review Letter, 23 (15), S. 880–884
- [8] Freedman, Stuart and Clauser, John (1972): Experimental Test of Local Hidden-Variable Theories. In: Physical Review Letter, 28 (14), S. 938–941
- [9] Aspect, Alain et al. (1981): Experimental Tests of Realistic Local Theories via Bell's Theorem. In: Physical Review Letter, 47 (7), S. 460–463
- [10] Aspect, Alain et al. (1982): Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A New Violation of

- Bell's Inequalities. In: Physical Review Letter, 49 (2), S. 91–94
- [11] Aspect, Alain et al. (1982): Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers. In: Physical Review Letter, 49 (25), S. 1804–1807
- [12] Homepage des milq-Kurses:  
<https://www.milq.info/milq-und-die-wesenszuge-der-quantenphysik/>  
(Stand 6/2024)
- [13] Bell, Jonathan (1964): On the Einstein Podolsky Rosen paradox. In: Physics, 1 (3), S. 195–200
- [14] Hardy, Lucien (1993): Nonlocality for two particles without inequalities for almost all entangled states. In: Physical Review Letter, 71 (11), S. 1665–1668

### **Danksagung**

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des Verbundprojekts „Professionelle Netzwerke zur Förderung adaptiver, prozessbezogener, digital gestützter Innovationen in der MINT Lehrpersonenbildung (MINT-ProNed)“ von Bund und Ländern aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung im Projekt „lernen:digital“ (Förderkennzeichen 01JA23M02L) unterstützt.