

## Praxisorientiertes Fortbildungskonzept mit Selbstlerneinheiten zur Quantenphysik

- Fokus auf Verschränkung und das quantenmechanische Weltbild -

Philipp Scheiger\*, Kim Kappl\*, Stefan Aehle<sup>+</sup>

\* Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 57, 70569 Stuttgart, <sup>+</sup>Friedrich-Schiller-Universität Jena, August-Bebel-Straße 4, 07743 Jena  
p.scheiger@physik.uni-stuttgart.de

### Kurzfassung

In diesem Beitrag wird ein Fortbildungskonzept für Physiklehrkräfte vorgestellt, das sich speziell auf den Themenbereich „Verschränkung“ und das „quantenmechanische Weltbild“ fokussiert. Aufbauend auf bestehenden Blended-Learning-Strukturen wurde ein neues Modul konzipiert, das grundlegende Begriffe wie Realität, Lokalität, Kausalität und Determinismus im Licht der Quantenphysik adressiert. Der Beitrag beschreibt die inhaltliche Struktur der Selbstlerneinheiten, ihre didaktische Umsetzung sowie exemplarische Anwendungen im Unterricht. Erste Rückmeldungen zeigen, dass insbesondere die methodisch geführte Gegenüberstellung von klassischem und quantenmechanischem Weltbild zu einem vertieften Verständnis beiträgt.

### 1. Motivation

Mit der Einführung der KMK-Bildungsstandards (2020) [1] und ihrer landesspezifischen Umsetzung wurden das quantenmechanisches Weltbild hinsichtlich der Begriffe Realität, Lokalität, Kausalität und Determinismus, sowie das Phänomen der Verschränkung fest in den Lehrplänen der Oberstufe verankert. Gleichzeitig zeigen Rückmeldungen aus Fortbildungen und Lehramtsausbildung, dass viele Lehrkräfte diese Konzepte als abstrakt und schwer vermittelbar empfinden. Besonders die Verschränkung ist schwer zu umreißen und häufig werden von Lernenden bei ersten Selbsterklärungen klassischen Konzepten wie „versteckte lokalen Parameter“ als Hilfsmittel herangezogen, was jedoch im Widerspruch zur heutigen Physik steht.

Um diese Herausforderungen zu adressieren, wurde ein neues Fortbildungsmodul entwickelt, das sich explizit den Widersprüchen zwischen klassischem und quantenmechanischem Weltbild widmet. Neben den Begriffen der Realität, Lokalität, Kausalität und dem Determinismus behandelt dieser Kurs die Frage nach der Vollständigkeit von physikalischen Theorien, weil dies ein wesentlicher Diskussionspunkt in dem berühmten Paper von Einstein, Podolsky und Rosen [2] war, in dem das Phänomen der Verschränkung zur ersten Mal beschrieben wurde.

Zusätzlich wird in diesem Beitrag ein Vorschlag gemacht, wie dieses Thema in der Schule behandelt werden kann, sowie die prozessbezogene Bewertungskompetenz [3] digitaler Medien adaptiv anhand dieses Themas geübt werden kann. In diesem Beitrag wird zunächst das Fortbildungskonzept (Kapitel 2) vorgestellt, anschließend werden in Kapitel 3 Definitionen der relevanten Begriffe auf Schulniveau

gegeben und in Kapitel 4 wird ein Vorschlag für eine Unterrichtssequenz gegeben.

### 2. Das Fortbildungskonzept

Das Fortbildungskonzept folgt dem Blended-Learning-Ansatz mit Selbstlerneinheiten, Online-Sprechstunden und optionalen Präsenzveranstaltungen. Das Gesamtkonzept wird in einem weiteren Beitrag [4] vorgestellt. Hier steht der Kurs „Q4 – Verschränkung und das quantenmechanische Weltbild“ im Zentrum. Dieser gliedert sich in folgende Abschnitte:

- Q4.1: Das klassische Weltbild (Realität, Lokalität, Kausalität, Determinismus)
- Q4.2: Einführung in das quantenmechanische Weltbild
- Q4.3: Vertiefung: Warum versteckte lokale Parameter Verschränkung nicht erklären
- Online live: Didaktische Umsetzung – Vorschläge für den Unterricht

Die relevanten Begriffe für das quantenmechanische Weltbild werden mit neu formulierten Schuldefinitionen eingeführt und systematisch mit aktivierenden Übungen im Moodle-Kurs vertieft. Q4.3 behandelt keine direkt für die Schule relevanten Inhalte. Hier sollen am Beispiel eines Experimentvorschlags nach Hardy [5] versteckte lokale Parameter als Erklärung für das Phänomen der Verschränkung ausgeschlossen werden. Als Hintergrundwissen kann diese Thematik für Lehrkräfte als relevant eingestuft werden.

### 3. Fachliche Klärung und Definitionen

Die für das quantenmechanische Weltbild relevanten Begriffe sollen in allgemeingültigen Definitionen für die Schule verständlich und anhand von Beispielen anschaulich gemacht werden. Da wir für die Schule noch keine ausführlichen Definitionen in der

Literatur gefunden haben, die diesem Anspruch gerecht werden, stellen wir hier unsere Vorschläge vor. Bei den vorgestellten Definitionen und Erklärungen handelt es sich um didaktische Reduktionen. Wir hoffen damit die Begriffe auch Schülerinnen und Schülern zugänglich zu machen. D.h. unsere Definitionen entsprechen nicht dem Stand der Wissenschaft und werden der fachlichen Tiefe, die sich teilweise hinter den Begriffen auftut, nicht volumnäßig gerecht. Für einen fachlichen Überblick wird auf weiterführende Literatur (bspw. [6-7]) verwiesen. Dennoch sind diese Definitionen umfänglicher als einfache Beispiele und Spezialfälle.

Zunächst werden die Begriffe für das klassische Weltbild definiert und anschließend für die Quantenmechanik neu eingeordnet.

### 3.1. Das klassische Weltbild

Bevor das quantenmechanische Weltbild verstanden werden kann, bzw. dessen Besonderheiten deutlich gemacht werden können, muss Lernenden das klassische Weltbild hinsichtlich der Begriffe Realität, Lokalität, Kausalität und Determinismus präsent sein. Zusätzlich behandelt dieser Kurs die Frage nach der Vollständigkeit von physikalischen Theorien. Dies war der ursprüngliche Kritikpunkt von Einstein, Podolsky und Rosen in ihrem berühmten Paper zur Vollständigkeit der Quantenmechanik [2]. Die Autoren beschrieben zu ersten Mal das Phänomen der Verschränkung, um damit zu veranschaulichen, dass die Quantenmechanik aus ihrer Sicht noch nicht vollständig sei.

Unsere Vorschläge als Definitionen zu diesen Begriffen lauten:

#### 3.1.1. Kausalität

Definition: „Das Prinzip der Kausalität besagt, dass Wechselwirkungen zweier physikalischer Systeme oder Ereignisse der strengen Abfolge von Ursache und Wirkung unterliegen. Aus der speziellen Relativitätstheorie ergibt sich, dass diese Wechselwirkung oder eine Informationsübertragung höchstens mit Lichtgeschwindigkeit passieren kann.“

Beispiel Lichtschalter:

Ein Lichtschalter wird betätigt und dadurch wird ein Stromkreis geschlossen (Ursache), an dem eine Lampe angeschlossen ist. Die Lampe leuchtet auf (Wirkung), allerdings nicht sofort sondern mit einer kurzen zeitlichen Verzögerung. Die Information über den geschlossenen Stromkreis (und damit auch die elektrische Energie) kann sich auch in der Leitung mit maximal Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. D.h. es ergibt sich ein zeitlicher Abstand von mindestens  $\Delta t = l/c$  zwischen dem Betätigen des Schalters und dem Aufleuchten der Lampe. Dabei ist  $c$  die Lichtgeschwindigkeit und  $l$  die Länge der Leitung vom Schalter zur Lampe.

#### 3.1.2. Determinismus

Definition: „Nach dem Prinzip des Determinismus ist ein physikalisches Ereignis (z.B. das Ergebnis einer Messung) eindeutig vorherbestimmt, wenn die Ausgangssituation mit ausreichender Genauigkeit bekannt ist.“

Beispiel Newtonsche Mechanik:

Wenn wir von einer Masse  $m_1$  den Ort  $x(t)$  und ihre Geschwindigkeit  $v(t)$  kennen, so können wir mit der Newtonschen Mechanik vorhersagen, wo sich die Masse zu jedem Zeitpunkt in Zukunft befinden wird.

#### 3.1.3. Realität

Definition: „Die Natur oder physikalische Realität liegt aus der Perspektive der klassischen Physik unabhängig von der Beobachtung oder Messung vor. Mit immer besseren Messapparaturen kann die physikalische Realität immer genauer beobachtet und immer besser mit physikalischen Modellen beschrieben werden.“

Beispiel Mond:

Der Mond ist immer da, selbst wenn niemand hinschaut.

#### 3.1.4. Lokalität

Definition: „Das Prinzip der Lokalität besagt, dass ein physikalisches System oder Ereignis ein Zweites nur beeinflussen kann, wenn eine physikalische Wechselwirkung zwischen beiden stattfinden kann. Für ein umfassendes Verständnis für die Lokalität muss die Relativitätstheorie und die darin formulierte Geschwindigkeitsgrenze der Lichtgeschwindigkeit in Vakuum, mit der Wechselwirkungen stattfinden, berücksichtigt werden.“

Beispiel unabhängiger Zerfall von Atomen:

Es finden zwei radioaktive Zerfälle von zwei Atomen zeitlich sehr eng nacheinander statt. Die Atome sind aber räumlich so weit von einander entfernt, dass die Information über den Zerfall des einen Atoms das zweite Atom vor dessen Zerfall nicht mehr erreichen kann, wenn diese Information mit maximal Lichtgeschwindigkeit unterwegs ist. Der Zerfall des einen Atoms kann den Zerfall des Zweiten somit nicht verursachen und beide Ergebnisse kommen unabhängig voneinander vor.

Beispiel Kernspaltung:

Beim Zerfall eines Uranatoms (235) werden Neutronen freigesetzt. Eines der Neutronen fliegt mit weniger als der Lichtgeschwindigkeit zu einem zweiten Uranatom, trifft dieses, was zur Spaltung führt. Hier verursacht der Zerfall des ersten Atoms den Zerfall des Zweiten. Dies ist aber nur möglich, weil das Neutron (als Information über den ersten Zerfall) mit einer kleineren Geschwindigkeit als der Lichtgeschwindigkeit das zweite Atom erreicht.

### 3.1.5. Vollständige Theorie

Definition: „Eine vollständige physikalische Theorie deckt jedes Element der physikalischen Realität ab. Wir kennen innerhalb dieser Theorie alles, was es zu Wissen gibt.“

## 3.2. Das quantenmechanische Weltbild

In diesem Abschnitt werden die Begriffe Realität, Lokalität, Kausalität und Determinismus aus der Sicht eines "quantenmechanischen" Weltbildes neu eingeordnet. Dafür wird zunächst die quantenmechanische Verschränkung definiert und es werden die Widersprüche hervorgehoben, die ein klassisches Weltbild und das Phänomen der Verschränkung erzeugen.

### 3.2.1. Die quantenmechanische Verschränkung

Definition: „Mehrere Quantenobjekte (oder -eigenschaften) können zusammen ein (kohärentes) System bilden, das durch eine gemeinsame Wellenfunktion beschrieben wird. Eine quantenmechanische Verschränkung liegt vor, wenn die Eigenschaften der einzelnen Teile des Systems nicht unabhängig voneinander vorliegen. D.h. eine Messung an einem Teil des Systems präpariert das Gesamtsystem so, dass durch das Messergebnis die Quanteneigenschaften der anderen Teile festgelegt werden.“

Verschränkung kann also nur auftreten, wenn wir Quantensysteme entsprechend kombinieren. Dies können komplementäre Eigenschaften eines Quantenobjekts sein (beispielsweise ist die Welcher-Weg-Information bei Interferometer-Experimenten verschränkt) oder die Kombination von mehreren Quantenobjekten. So ist es gängige Praxis an speziellen Kristallen aus einem Photon mit hoher Energie zwei Photonen mit niedrigerer Energie zu erzeugen, deren Polarisation verschränkt ist. Sind beispielsweise zwei Photonen in einem sogenannten „anti-korrelierten Bell-Zustand“ verschränkt und Photon 1 wird mit vertikaler Polarisation gemessen, so muss an Photon 2 eine horizontale Polarisation gemessen werden und umgekehrt. In diesem Beispiel können wir aber nie an beiden Photonen die gleiche Polarisation messen. Welche Polarisation an Photon 1 gemessen wird können wir wegen des **stochastischen Verhaltens** (Wesenszug der QM) der Quantenphysik nicht vorhersagen. Sobald die Polarisation eines Photons aber gemessen wurde, wissen wir automatisch auch alles über die Polarisation des zweiten. Ein verschränkter Zustand ist dabei eine komplekte Beschreibung des kombinierten Quantensystems. Es existieren keine weiteren Informationen über das System.

### 3.2.2. Kausalität

Wechselwirkungen zweier physikalischer Systeme oder Ereignisse unterliegen weiterhin der strengen Abfolge von Ursache und Wirkung. Die Wahl des experimentellen Aufbaus (Ursache) hat Auswirkungen auf das Ergebnis (Wirkung) des Experiments. So hat z.B. die Wahl der Spaltbreite Auswirkungen auf das Ergebnis des Doppelspalteperiments. Die

Ausnahme bildet der Messprozess, hier kann nach der Wahrscheinlichkeitsbestimmung keine Ursache angegeben werden, warum genau dieser eine Zustand und kein anderer (aber nach der Wahrscheinlichkeit möglicher) Zustand gemessen wurde.

### 3.2.3. Determinismus

Auch die Quantenmechanik hat viele deterministische Aspekte und das quantenmechanische Verständnis des Determinismus bleibt bis auf eine Ausnahme gleich wie in der klassischen Weltsicht. So können wir über die Schrödinger-Gleichung vieles im Voraus berechnen, Messbereiche eingrenzen und die einzelnen Messergebnisse sind eindeutig (Wesenszug der QM). Die Ausnahme bildet das stochastische Verhalten, welche Ergebnisse konkret gemessen werden, als zentraler Wesenszug der Quantenphysik. Der Zufall hinter dieser Wahrscheinlichkeitsaussage schränkt den Determinismus, wie die Kausalität, in der Quantenphysik ein. D.h. der quantenmechanische Determinismus bezieht sich nicht auf den exakten Wert, der für eine Messung vorhergesagt werden kann, sondern gibt für jeden möglichen Messwert eine Wahrscheinlichkeit, diesen zu messen.

### 3.2.4. Realität

Die Natur oder physikalische Realität existiert auch in der Quantenphysik. In der Quantenphysik hat die Messung aber einen Einfluss auf die Natur oder Realität. Vor und nach einer Messung können unterschiedliche Zustände, z.B. unterschiedliche Polarisationsrichtungen, vorliegen. Mehrere Möglichkeiten tragen gemeinsam zu einer neuen Realität bei, wie die Fähigkeit zur Interferenz zeigt. So können zwei unterschiedliche Eigenschaften (z.B. horizontale und vertikale Polarisation eines Photons oder die Weg-Information im Interferometer) gleichzeitig vorliegen (Fähigkeit zur Interferenz) aber nie gleichzeitig gemessen werden (Eindeutigkeit der Messergebnisse).

### 3.2.5. Lokalität

Das Phänomen der Verschränkung ist der Grund, warum die Quantenmechanik heute als „nicht-lokale“ Theorie bezeichnet wird. Die Messung an einem Quantenobjekt in einem verschränkten Zustand hat unmittelbar und damit mit Überlichtgeschwindigkeit Einfluss auf die Messung des verschränkten Partners. Wir können dieses Phänomen aber nicht nutzen, um Informationen oder Nachrichten mit Überlichtgeschwindigkeit zu verschicken, weil wir die konkreten Messergebnisse nicht bewusst manipulieren können (aufgrund des statistischen Verhalten und damit des absoluten Zufalls in der Quantenphysik).

### 3.2.6. Vollständige Theorie

Gäbe es z.B. versteckte lokale Parameter, die die Messergebnisse an verschränkten Quantenobjekten vorherbestimmen und die die Physik noch nicht kennt, wäre die Quantenphysik keine vollständige Theorie. Dies war eine zentrale Forderung von Einstein, Podolsky und Rosen in ihrem berühmten

Artikel aus dem Jahr 1935 [2]. Spätere Theorien und Experimente (für die 2022 der Nobelpreis in Physik verliehen wurde) haben die Existenz von solchen Parametern aber widerlegt [8-12]. Die Quantenmechanik ist in sich eine vollständige Theorie und kann nicht durch lokale Parameter verbessert werden.

### 3.3. Zusammenfassung

Das klassische Weltbild geht davon aus, dass physikalische Eigenschaften unabhängig von Beobachtung existieren (Realität), kausale Zusammenhänge mit endlicher Geschwindigkeit ablaufen (Lokalität), Ereignisse vorherbestimmt sind (Determinismus) und eine vollständige Theorie alle Eigenschaften der Natur beschreibt.

Demgegenüber steht das quantenmechanische Weltbild, das z.B. durch verschränkte Photonenpaare die Begriffe Realität und Lokalität fundamental infrage stellt. Verschränkung bedeutet, dass zwei Quantenobjekte (oder -eigenschaften) so miteinander verbunden sind, dass eine Messung an einem Objekt sofort den Zustand des anderen festlegt – unabhängig von der Entfernung. Dabei zeigt sich, dass die Quantenmechanik eine „nicht-lokale“ Theorie ist und darüber hinaus keine versteckten lokalen Variablen benötigt – sie ist in sich vollständig.

## 4. Unterrichtsvorschlag

Um Lehrkräften didaktisch tragfähige Umsetzungen für den eigenen Unterricht bereitzustellen, wurde ein konkreter, siebenteiliger Unterrichtsvorschlag entwickelt, der sowohl fachliche als auch prozessbezogene Kompetenzen fördert. Konkret soll im Anschluss an den inhaltlichen Input die Bewertungskompetenz von digitalen Medien geübt werden. Aktivierende und interaktive Übungsphasen mit Hilfe der Peer-Instruction [13] ermöglichen den Lehrkräften die spätere Übungsphase adaptiv zu gestalten und damit an die Leistungen der SchülerInnen anzupassen.

### 4.1. Phase 1: Input/Selbststudium – Einführung in das klassische Weltbild

Ziel: Aktivierung des Vorwissens sowie Klärung zentraler Begriffe wie Realität, Lokalität, Kausalität und Determinismus im Sinne der klassischen Physik. Die Schülerinnen und Schüler erhalten Definitionen und einfache alltagsnahe Beispiele, die das klassische Verständnis dieser Begriffe veranschaulichen. Diese Phase legt die konzeptuelle Grundlage, zu der später das quantenmechanische Weltbild gegenübergestellt werden kann.

### 4.2. Phase 2: Übungsphase – Peer Instruction zu klassischen Konzepten

Ziel: Tiefere Begriffsverankerung und erste Anwendung durch konzeptuelle Fragen.

Mithilfe des Peer-Instruction-Ansatzes (nach Eric Mazur [13]) diskutieren die SchülerInnen gezielte Verständnisfragen, die sich um die vorher eingeführten Begriffe des Weltbildes drehen. So wird

erkennbar, ob die klassischen Konzepte wirklich verstanden wurden, bzw. die SchülerInnen unterstützen sich gegenseitig bei Verständnisschwierigkeiten.

### 4.3. Phase 3: Input/Selbststudium – Die quantenmechanische Verschränkung

Ziel: Aufbau eines Verständnisses um das Phänomen der Verschränkung.

Die Lernenden erhalten eine Einführung in verschränkte Quantenzustände. Die Schülerdefinitionen werden in verständlicher Sprache eingebunden und durch grafische Beispiele (z. B. Polarisationszustände) ergänzt.

### 4.4. Phase 4: Übungsphase – Peer Instruction zur Verschränkung

Ziel: Überprüfung und Verankerung des neuen Wissens.

Auch hier kommen konzeptuelle Fragen zum Einsatz, diesmal mit Fokus auf „Korrelationsmessungen“ oder typische Missverständnisse wie „Informationsübertragung mit Überlichtgeschwindigkeit“.

### 4.5. Phase 5: Gruppenarbeit – „Mimic Einstein“ Widersprüche herausarbeiten

Ziel: Vergleich beider Weltbilder und Identifikation von Spannungsfeldern.

In dieser Phase analysieren die SchülerInnen in Gruppenarbeit, wo genau die quantenmechanischen Konzepte den klassischen Vorstellungen widersprechen. Dies geschieht z. B. anhand der Frage: „Was hat Einstein an dieser Theorie gestört?“ Aufgabe ist es die klassischen Definitionen für die Quantenmechanik anzupassen.

### 4.6. Phase 6: Ergebnissicherung – Konsequenzen für das Weltbild

Ziel: Zusammenfassung der Erkenntnisse und bewusste Reflexion der Konsequenzen.

In dieser Phase formulieren die Lernenden, wie sich ihr physikalisches Weltbild verändert hat. Begriffe wie Realität und Determinismus werden neu eingeordnet. Diese Reflexion kann schriftlich oder in moderierten Plenumsdiskussionen erfolgen und kann als Grundlage für eine Leistungsbewertung dienen. Wichtig ist hier auch die Betonung, dass Quantenphysik nicht im Widerspruch zur Realität steht, sondern eine neue Sichtweise auf sie anbietet.

### 4.7. Phase 7: Adaptive Übungsphase – Kritischer Umgang mit Quellen und Quanten-Behauptungen

Ziel: Förderung digitaler Recherche- und Bewertungskompetenzen.

In dieser abschließenden Phase arbeiten die SchülerInnen mit populärwissenschaftlichen und pseudowissenschaftlichen Quellen (z. B. zum Thema „Quantenheilung“ und Teleportation) und wenden ihre fachlichen Kenntnisse an, um die Inhalte und ihre

Aufbereitung kritisch zu bewerten. Diese Übung stärkt die Fähigkeit zur Differenzierung zwischen wissenschaftlicher Evidenz, spekulativer Interpretation und falschen Behauptungen – eine Schlüsselkompetenz in einer zunehmend digitalisierten Welt.

## 5. Zusammenfassung

Das vorgestellte Fortbildungskonzept stellt einen praxisnahen Ansatz dar, um Lehrkräfte beim Vermitteln grundlegender Konzepte der Quantenphysik zu unterstützen – insbesondere beim Vergleich des klassischen Weltbildes mit einem modernen quantenmechanischen Weltbildes. Durch die Verbindung von Selbstlernphasen mit interaktiven Elementen, sowie neuen und für die Schule didaktisch reduzierten Definitionen zentraler Begriffe wie Realität, Lokalität, Kausalität und Determinismus, gelingt es dem Kurs, ein oft als abstrakt empfundenes Thema greifbar zu machen.

Das Phänomen der Verschränkung nimmt bei der Herausarbeitung der Unterschiede zwischen dem klassischen und dem quantenmechanischen Weltbild eine zentrale Rolle ein. Als Vertiefung und für das Hintergrundwissen der Lehrkräfte werden außerdem versteckte lokale Parameter als Erklärung für die Verschränkung ausgeschlossen.

Ein siebenteiliger Unterrichtsvorschlag überträgt die Inhalte zudem in konkrete schulische Praxis und fördert neben Fachkompetenzen auch kritisch-reflexive Fähigkeiten im Umgang mit digitalen Medien und populärwissenschaftlichen Aussagen.

## 6. 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](https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/2020/2020_06_18-BildungsstandardsAHR_Physik.pdf) (Stand: 4/2025)
- [2] Einstein, Albert; Podolsky, Boris and Rosen, Nathan (1935): Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? In: Physical Review, 47 (10), S. 777–780
- [3] 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](https://www.bildungsplaene-bw.de/site/bildungsplan/get/documents/lsbw/export-pdf/depot-pdf/ALLG/BP2016BW_ALLG_GYM_PH.pdf) (Stand 05/2025)
- [4] Aehle, Stefan; Kappl, Kim; Scheiger, Philipp (2025): Praxisorientiertes Fortbildungskonzept mit Selbstlernseinheiten zur Quantenphysik. In: PhyDid B, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, 1 (2025)
- [5] Hardy, Lucien (1993): Nonlocality for two particles without inequalities for almost all

entangled states. In: Physical Review Letter, 71 (11), S. 1665–1668

- [6] Lambare, Justo Pastor (2022): On the Meaning of Local Realism. In: Foundations of Physics, 52 (5), S. 98.1–98.15.
- [7] Sheldon Goldstein et al. Bell's theorem. Scholarpedia, 6(10):8378 (2011) url: [http://www.scholarpedia.org/article/Bell%27s\\_theorem](http://www.scholarpedia.org/article/Bell%27s_theorem) (Stand 05/2025)
- [8] Clauser, John et al. (1969): Proposed Experiment to Test Local Hidden-Variable Theories. In: Physical Review Letter, 23 (15), S. 880–884
- [9] Freedman, Stuart and Caluser, John (1972): Experimental Test of Local Hidden-Variable Theories. In: Physical Review Letter, 28 (14), S. 938–941
- [10] Aspect, Alain et al. (1981): Experimental Tests of Realistic Local Theories via Bell's Theorem. In: Physical Review Letter, 47 (7), S. 460–463
- [11] 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
- [12] Aspect, Alain et al. (1982): Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers. In: Physical Review Letter, 49 (25), S. 1804–1807
- [13] Mazur, Eric (2017): Peer Instruction: Springer Berlin, Heidelberg

## 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 Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) im Projekt „lernen:digital“ (Förderkennzeichen 01JA23M02L) unterstützt.