

Quantenphysik in Klasse 9 - Ergebnisse einer Akzeptanzbefragung für ein Spin-First-Unterrichtskonzept

Carsten Albert^{*+}, Gesche Pospiech⁺

^{*} Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden

⁺ Technische Universität Dresden, Professur für Didaktik der Physik

c.albert@ifw-dresden.de, gesche.pospiech@tu-dresden.de

Kurzfassung

Quantenphysik gilt als eines der herausforderndsten Themen bei der Vermittlung von Physik und ist gleichzeitig von herausragender Bedeutung bei künftigen technologischen Entwicklungen. Mit Blick auf den wachsenden Stellenwert der Quantenphysik innerhalb der schulischen Bildung wurde im Rahmen eines Design-Based-Research-Projektes ein Lehrkonzept entwickelt, das einen qualitativen und anknüpfungsfähigen Zugang zur Quantenphysik bereits in Klassenstufe 9 ermöglichen soll. Die Lerninhalte bauen dabei auf dem Elektronenspin als exemplarisches Zweizustandssystem auf.

Mit dem Ziel einer ersten formativen Evaluierung wurden Akzeptanzbefragungen durchgeführt, um die Vermittlungsstrategie zu überprüfen und vor einer ersten Erprobung mit Schulklassen anzupassen. Die Interviews konnten zeigen, dass mit dem Ansatz die intendierten Inhalte überwiegend erfolgreich vermittelt werden können und dass ein weiterer Einsatz des Konzeptes im Rahmen von Feldstudien legitim erscheint. Außerdem gaben sie Hinweise und Impulse für erste Anpassungen am Konzept.

1. Motivation und Zielstellung des Projektes

1.1. Quantentechnologien als curricularer Zugang zur Quantenphysik

Die Quantentheorie gilt häufig als die erfolgreichste Theorie überhaupt. Innerhalb der Physik ist sie von tragender Bedeutung – sie hat unser Verständnis von fundamentalen physikalischen Prinzipien nachhaltig geprägt und ist wesentliche Grundlage für ein breites Anwendungsspektrum in Technik und Wissenschaft. Während bereits heute beispielsweise unsere gesamte Halbleitertechnik auf Anwendung der Quantenphysik in Festkörpern beruht, birgt die Manipulation von Quantenzuständen einzelner Quantenobjekte enormes Potential für die Technologien der Zukunft. So basieren etwa Quantencomputer auf der Manipulation von Quantenzuständen durch Quantengatter.

Solche modernen Quantentechnologien nutzen häufig die gezielte Manipulation quantenphysikalischer Zweizustandssysteme, s. g. „Qubits“. Bei Zweizustandssystemen handelt es sich allgemein um Systeme mit einer physikalischen Eigenschaft, die nur zwei mögliche Werte annehmen kann – während andere Eigenschaften als unverändert angesehen werden (Dür & Heusler, 2016). Das Lehrbuchbeispiel für ein quantenphysikalisches Zweizustandssystem ist der Spin eines Spin-1/2-Teilchens.

Doch nicht nur bei den technischen Anwendungen bieten Qubits enormes Potential. Auch im curricularen Sinne scheinen Zweizustandssysteme als grundlegende Elemente der Quanteninformatik gut geeignet zu sein, einen Zugang zu elementaren Konzepten der Quantenphysik zu bieten. Sie erlauben u. a. eine klare Begriffsbildung und sind dabei einfacher als komplexe traditionelle Quantensysteme wie Atome oder Festkörper (Müller, 2016). Bereits an solchen einfachen Systemen können wesentliche Konzepte der Quantenphysik erarbeitet werden (Dür & Heusler, 2014).

Der Einstieg in die Quantenphysik bzw. die Erarbeitung zentraler Prinzipien anhand eines Modell-Qubits („Spin-First-Ansatz“) ist insbesondere im schulischen Bereich noch relativ unerforscht. Im Bereich der Hochschullehre gibt es hier allerdings bereits erste positive Erfahrungen (Sadaghiani & Munteanu, 2015).

1.2. Quantenphysik in der Schule

Hinsichtlich der tragenden Rolle innerhalb der Physik und der Bandbreite aktueller und künftiger Technologien kann die Quantenphysik als wichtiger Bereich physikalischer Allgemeinbildung in der Schule angesehen werden (Schöne & Pospiech, 2014). Wenngleich Deutschland eine verhältnismäßig lange Tradition zur Quantenphysik in der Schule hat (Stadermann et al., 2019), wird das Thema dennoch nach wie

vor praktisch ausschließlich in der Oberstufe behandelt. Das geschieht zudem häufig noch über einen quasi-historischen Zugang, der aus fachdidaktischer Sicht heute eher kritisch gesehen wird (Stadermann et al., 2019). Aktuelle Entwicklungen der Fachdidaktik orientieren sich dagegen an Quantentechnologien (Müller & Wilhelm, 2021), und damit auch an grundlegenden Konzepten wie Indeterminismus, Nicht-Lokalität oder Superposition. Ergänzend dazu fokussieren sich auch die jüngsten Beschlüsse der KMK zu den Bildungsstandards in der gymnasialen Oberstufe auf diese nichtklassischen Aspekte (Ständige Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland, 2020). Somit werden beispielsweise Zugänge flankiert, die auf den von Küblbeck und Müller (2007) formulierten Wesenszügen der Quantenphysik beruhen.

Es gibt bisher kaum fachdidaktisch fundiert entwickelte und evaluierte Lehrkonzepte für einen qualitativen Zugang zu moderner Quantenphysik in der Mittelstufe – insbesondere nicht für eine besonders frühe Einführung in das Thema in Klasse 9. In Hinblick auf die Lernvoraussetzungen überrascht das zwar nicht. Jedoch wirken solche Konzepte im Sinne der physikalischen Allgemeinbildung äußerst wünschenswert – insbesondere in Anbetracht der Tatsache, dass die meisten Schülerinnen und Schüler Physik vor Eintritt in die Oberstufe abwählen (Heise, 2014) und die Physik der Mittelstufe im Wesentlichen die Themen des 18. und 19. Jahrhunderts präsentiert (Hertel & Grossmann, 2016). Elemente der Quanteninformatik bieten auch in diesem Licht die Chance, grundlegende nichtklassische Konzepte der Quantenphysik bereits frühzeitig kontextorientiert und qualitativ zu vermitteln.

1.3. Studienziel und DBR-Paradigma

Aus dem geschilderten Stand ergab sich das Ziel, ein fachdidaktisch gut begründetes und auf die Zielgruppe angepasstes Lehrkonzept für einen qualitativen und phänomenbasierten Einstieg in die Quantenphysik für die Mittelstufe zu entwickeln. Konkret adressiert der Kurs Schülerinnen und Schüler der Klassenstufe 9, und damit eine besonders junge und auf diesem Gebiet unerforschte Zielgruppe.

Das Vorgehen bei der Entwicklung des Konzeptes ist entsprechend explorativ und kann nur Hand in Hand mit einer ständig begleitenden Evaluierung erfolgreich sein. Das Studiendesign entspricht damit einem Design-Based-Research-Paradigma: unter der Zielstellung der Entwicklung einer nachhaltigen Innovation für die Unterrichtspraxis wird ein Lehrkonzept zur Quantenphysik für Klasse 9 mithilfe eines multiperspektiven Ansatzes entwickelt und evaluiert. Dabei werden verschiedene Schritte der formativen Evaluierung und des Konzept-Re-Designs durchlaufen, die schlussendlich in einer summativen Evaluierung münden.

2. Einblick in das Lehrkonzept

Mittlerweile ist die Quantenphysik auch im Bereich der Fachdidaktik ein relativ gut erforschtes Feld (Bitzenbauer, 2021). Es existieren zahlreiche Lehrkonzepte sowie Studien zu Lernschwierigkeiten. Solche empirischen Befunde existieren jedoch nicht für die hier adressierte Zielgruppe. Der Entwicklung des Kurses liegt daher die Arbeitshypothese zugrunde, dass die bekannten Hindernisse sowie potentielle Ansätze in Grenzen auch z. T. von der Oberstufe auf die adressierte Zielgruppe übertragen werden können.

2.1. Design-Prinzipien

Ausgehend von den bekannten fachdidaktischen Befunden zur Lehre in der Quantenphysik sowie der Zielgruppe basiert das Unterrichtskonzept auf den folgenden Design-Prinzipien:

- a) Aufbau auf quantenphysikalischen Zweizustandssystemen (Qubits)
- b) vollständiger Verzicht auf das Konzept von Wellen
- c) klare Begriffsbildung und Sprachsensibilität
- d) Phänomen- und Konzeptorientierung
- e) Erarbeitung von Phänomen entlang klar definierter Wesenszüge
- f) Abgrenzung und Zusammenhang zwischen moderner und klassischer Physik herausarbeiten
- g) Gamification zum Einstieg in die Thematik

Diese Prinzipien werden im Rahmen der folgenden unterrichtspraktischen Eckpunkte angewendet:

- Schulart: Gymnasium
- Klassenstufe: 9
- Ansatz: Zugang mittels Elektronenspin

2.2. Aufbau des Vermittlungskonzeptes

Der kapitelweise Aufbau des Konzeptes ist in Abbildung 1 dargestellt.

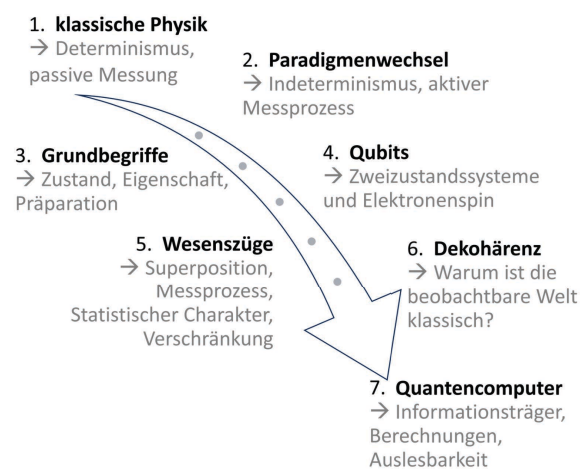


Abb. 1: Sachstruktur des Vermittlungskonzeptes.

Das Konzept ist grundlegend sachstrukturiert und dabei gleichzeitig kontextorientiert. Im Verlauf des Konzeptes werden Aspekte erarbeitet, um zum Schluss durch deren Vernetzung die grundlegende Funktionsweise eines Quantencomputers verstehen zu können.

Die Dauer des Konzeptes ist mit etwa sieben bis acht Doppelstunden angesetzt.

Dabei werden zu Beginn nach einem Überblick zu den Teilgebieten der Physik ganz grundlegende übergeordnete Prinzipien der klassischen Physik und der Quantenphysik erarbeitet (z. B. Determinismus vs. Indeterminismus).

Zur motivationalen Unterstützung wird hier im Sinne eines aktivierenden Einstieges der Einsatz des digitalen Serious Games „Katze Q“ eingebettet (Gamification). Damit werden vornehmlich affektive Lernziele adressiert und aktuelle medienpädagogische Ansätze aufgegriffen (Ferrzi-Valero et al., 2020; Kalogiannakis, 2021).

Anschließend wird, aufbauend auf Grundbegriffen, in das Konzept von Zweizustandssystemen eingeführt (Elektronenspin als Qubit auf Grundlage des Stern-Gerlach-Experimentes).

Zentraler Bestandteil ist die Erarbeitung von Wesenszügen der Quantenphysik. Diese orientieren sich an den Wesenszügen von Küblbeck und Müller (2007), wurden allerdings mit Hinblick auf Design-Prinzipien, Zielgruppe und Kontextorientierung z. T. abgeändert oder ergänzt. Die diskutierten Wesenszüge sind in Abbildung 2 dargestellt.

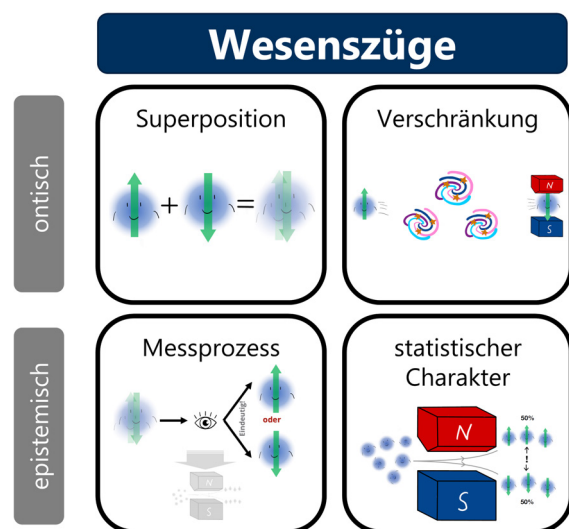


Abb. 2: Wesenszüge der Quantenphysik im Unterrichtskonzept.

Es folgt im Sinne einer offenen Diskussion zum Zusammenhang von Quantenphysik und klassischer Physik ein Kapitel zur Dekohärenztheorie. Dieses Vorgehen verfolgt auch das Ziel einer Entmystifizierung der Quantenphysik.

Schlussendlich werden alle erarbeiteten Aspekte gebündelt, um das grundlegende physikalische Arbeitsprinzip eines Quantencomputers (Informationsträger, Berechnungen, Auslesbarkeit) zu erarbeiten.

3. Einordnung der Akzeptanzbefragungen in den forschungsmethodischen Rahmen

Wie bei DBR-Studien üblich, ist der methodische Verlauf des Forschungsprojektes gerade auch aufgrund seines explorativen Charakters nicht linear, sondern zyklisch.

Zur Realisierung und Untersetzung des auf Grundlage der Design-Prinzipien entworfenen Unterrichtskonzeptes wurden folgende Materialien entwickelt:

- Lehrtext
- Arbeitsheft mit Lösungsheft
- Arbeitsblätter
- didaktischer Leitfaden
- HTML-Simulation (ergänzt nach der Akzeptanzbefragung)
- exemplarische Stoffverteilung/Planung (auf Grundlage des Pilotunterrichtes)

Um das Konzept und den Vermittlungsansatz einer grundlegenden ersten empirischen Erprobung zu unterziehen und basierend darauf anpassen zu können, wurden in einem ersten Schritt der formativen Evaluierung Akzeptanzbefragungen durchgeführt. Diese Form der Interviews dient u. a. dem Aufdecken von Verständnisschwierigkeiten und der Nachzeichnung von initiierten Lernverläufen.

Nach einer Überarbeitung des Materials begann eine zweite Phase zur formativen Evaluierung, in der das Konzept vom Studienautor sowie einem studentischen Mitarbeiter im zweiten Schulhalbjahr 2022/23 in insgesamt sechs Schulklassen oder Ferienkursen unterrichtet wird. Nach jeder Unterrichtsphase wird das Material auf Grundlage der Erfahrungen und gewonnenen Daten (durch Lerntagebücher, Lehrtagebücher, Reflexionen und Feedback von Lehrkräften und Lernenden, Interviewaussagen) weiter angepasst.

Parallel zu diesem Pilotunterricht werden Erhebungsinstrumente entwickelt: neben einem Interviewleitfaden insbesondere ein geschlossener Fragebogen zum erworbenen deklarativen Wissen sowie ein ebenfalls geschlossener Vorstellungsfragebogen. Diese werden im Zuge des Pilotunterrichtes strukturiert entwickelt, validiert und auf ihre psychometrische Eignung hin untersucht.

Die Hauptstudie findet mit dem Ziel einer summativen Evaluierung unter Beteiligung externer Lehrkräfte im Schuljahr 2023/24 statt.

Im Folgenden wird auf die Durchführung und Auswertung der ersten Phase der formativen Evaluierung, den Akzeptanzbefragungen, näher eingegangen.

4. Zielstellung und Forschungsfragen zur formativen Evaluierung

Die erste formative Evaluierung des Vermittlungsansatzes bzw. der Design-Prinzipien unterlag fünf wesentlichen Zielen:

- Überprüfung der inhaltlichen Vermittlungsstrategie der Unterrichtskonzeption
- Beschreibung von Schwierigkeiten im Zusammenhang mit der Unterrichtskonzeption
- Einschätzung der Unterrichtskonzeption aus Sicht der Lernenden
- Erfassung von Vorwissen sowie Vorwissensquellen
- Ableitung von sinnvollen Veränderungen am Unterrichtskonzept vor der ersten Feld-Pilotierung

Aus diesen Zielen ergaben sich die folgenden Forschungsfragen (FF) zur Vermittlungsstrategie:

- FF1: Inwiefern konnten die angestrebten fachlichen Inhalte vermittelt werden?
- FF2: Mit welchen Lernschwierigkeiten ist bei der Durchführung des Konzeptes zu rechnen?
- FF3: Wie schätzen die Lernenden das Vorgehen bei der Vermittlung insgesamt ein?
- FF4: Verfügen die Lernenden über relevantes Vorwissen für das Unterrichtskonzept?

Vor einem Einsatz des Unterrichtskonzeptes im regulären Schulunterricht erscheint es sinnvoll und notwendig, diese Fragen im Rahmen einer Laborstudie zu untersuchen und damit bei positiven Ergebnissen eine Feldstudie zu legitimieren.

5. Einsatz der Akzeptanzbefragungen

5.1. Methodik

In Hinblick auf die Zielstellung und Forschungsfragen wurde sich für die Durchführung von s. g. „Akzeptanzbefragungen“ (engl. „Teaching Experiments“) entschieden. Dabei handelt sich um ein, gerade auch zur Entwicklung von Unterrichtskonzepten, übliches Vorgehen zur formativen Evaluierung (Bitzenbauer, 2020).

Akzeptanzbefragungen sind leitfadenbasierte (teilstrukturierte) Interviews, denen eine zyklische Folge von Interventions- und Befragungsphasen zugrunde liegt (Bitzenbauer, 2020). Die Methode geht auf Jung (1992) zurück und wurde von Wiesner und Wodzinski (1996) weiterentwickelt.

Zur inhaltlichen Strukturierung der Befragung wurden nach Top-Down-Prinzip insgesamt sieben fachlich zentrale Bausteine der Vermittlungsstrategie herausgearbeitet (siehe Tabelle 1). Sie spiegeln im Wesentlichen die Sachstruktur des Konzeptes wider und werden in Anlehnung an Bitzenbauer (2020) im Folgenden als „Key-Ideas“ bezeichnet.

Der Ablauf der Befragung, orientiert an Wiesner und Wodzinski (1996) und adaptiert nach Bitzenbauer (2020) und Burde (2018), gestaltet sich wie folgt (siehe auch Abbildung 3):

- Informationsangebot:**
Der Interviewer gibt mündlich eine Erklärung.
- Befragung nach Akzeptanz:**
Der/Die Befragte wird aufgefordert, die Erklärung zu bewerten.
- Paraphrasierung:**
Der/Die Befragte wird aufgefordert, die Erklärung mit eigenen Worten wiederzugeben.
- Anwendung/Transfer:**
Der/Die Befragte wird aufgefordert, die Erklärung auf ein konkretes Beispiel anzuwenden.

Diese vier Schritte wurden linear für jede Key-Idea durchlaufen.

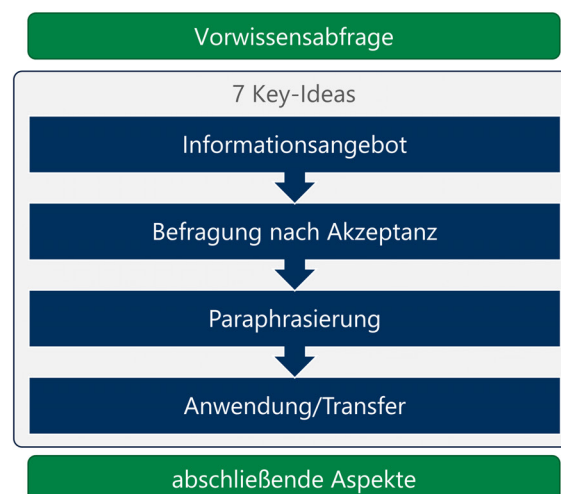


Abb. 3: Ablauf der Befragung.

Zur besseren Strukturierung und Nachvollziehbarkeit wurde das Interview mithilfe von Leitfragen gegliedert, denen die in Tabelle 1 dargestellten Key-Ideas zugeordnet waren. Die Informationsangebote wurden entlang des Lehrtextes entwickelt, die Anwendungs-/Transferaufgaben wurden dem entwickelten Arbeitsheft entnommen.

Tab. 1: Leitfragen und Key-Ideas.

Leitfrage	Key-Idea
Was macht die klassische Physik aus und was ist Quantenphysik?	Determinismus vs. Indeterminismus
Wie kann man Quantenphysik am einfachsten beschreiben?	Elektronenspin als Zweizustandssystem
Was macht die Quantenphysik aus? Wesenszüge der Quantenphysik	Superposition und Messprozess
	statistischer Charakter
	Verschränkung
Warum erscheint uns die Welt klassisch?	Dekohärenz
Was ist ein Quantencomputer?	Grundidee des Quantencomputers

5.2. Ablauf und Setting

5.2.1. Ablauf

Der Ablauf der Akzeptanzbefragungen gliederte sich (linear) wie folgt:

- Vorbereitung der Interviews
- Durchführung der Interviews
- Transkription der Interviews
- strukturierte Bewertung der Interviews (deduktiv) durch zwei unabhängige Rater
- weitere Exploration der Transkripte (deduktiv-induktiv)

5.2.2. Durchführung

Die Akzeptanzbefragungen fanden im Zeitraum Oktober 2022 bis November 2022 im Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden statt. Insgesamt nahmen elf Schülerinnen und Schüler an den Interviews teil (sechs weiblich, fünf männlich).

Zehn Schülerinnen und Schüler besuchten die 9. Klasse an sächsischen Gymnasien, ein Schüler besuchte die 9. Klasse einer sächsischen Realschule.

Für einen Überblick über das Sampling wurden die letzten beiden (Halb-)Jahresnoten in Physik erhoben ($m = 2.09$, $SD = 0.7$, $\min = 1$, $\max = 3$). Die Interviewdauer betrug im Schnitt etwa zwei Stunden und alle Interviews wurden ohne längere Unterbrechung durchgeführt. Eine der Schülerinnen war stumm, sodass sie ihre Aussagen schriftlich, aber in Echtzeit gab.

Dem Interview lag ein Interviewleitfaden sowie eine begleitend-strukturierende Bildschirm-Präsentation mit Informationsangebot und Aufgaben zugrunde.

5.2.3. Transkription

Die Interviews wurden als Audiodatei aufgezeichnet und anschließend transkribiert und anonymisiert. Die inhaltlich-semantische Transkription geschah auf Grundlage eines Transkriptionsleitfadens, die Regelgrundlage orientierte sich dabei an Dresing und Pehl (2018) und Burde (2018). Die Anonymisierungsregeln orientierten sich an Meyermann und Porzelt (2014).

5.2.4. Auswertung

Die Interviews wurden anschließend auf Grundlage eines zuvor entwickelten Kodierleitfadens zunächst entsprechend einer strukturierten skalierenden Inhaltsanalyse nach Mayring (2010) deduktiv kodiert.

Das dabei verwendete Kategoriensystem war, wie bei Akzeptanzbefragungen üblich, ordinal-skaliert und die entsprechende Kodierung der Schülerantworten erfolgte auf einer dreistufigen Skala für jede der drei Befragungsphasen. Tabelle 2 zeigt eine Kurzübersicht über die Kategorien.

Tab. 2: Kategoriensystem (ordinal-skaliert).

Befragung nach Akzeptanz		
Stufe	Stufenname	kodierter Wert
1	vollständige Akzeptanz	0
2	eingeschränkte Akzeptanz	0.5
3	keine Akzeptanz	1

Paraphrasierung		
Stufe	Stufenname	kodierter Wert
1	gelungene Paraphrasierung	0
2	befriedigende Paraphrasierung	0.5
3	mangelhafte Paraphrasierung	1

Anwendungs-/Transferaufgabe		
Stufe	Stufenname	kodierter Wert
1	gelungene Lösung	0
2	befriedigende Lösung	0.5
3	mangelhafte Lösung	1

Diese Auswertung fand innerhalb von zwei Bewertungsrunden durch zwei unabhängige Rater (Studienautor und studentischer Mitarbeiter) statt. Nach der ersten Runde wurden Leitlinien für den Umgang mit Grenzfällen im Kodierleitfaden festgelegt (Mayring, 2010).

Nach der strukturierten Phase der numerischen Kategorisierung der Schülerantworten fand eine weitere Exploration des Materials statt, etwa nach Vorwissen, Hinweisen auf weitere Lernschwierigkeiten oder zur Identifikation von Verbesserungspotential in den Lehrmaterialien. Das Gesamtverfahren ist damit deduktiv-induktiv.

6. Auswertung

6.1. Ergebnisse

Eine Key-Idea wird innerhalb eines Schrittes der Befragungsstruktur (Akzeptanz, Paraphrasierung, Anwendungs-/Transferaufgabe) in Anlehnung an Bitzenbauer (2020) als überwiegend akzeptiert bzw. gelungen bezeichnet, wenn das durchschnittliche Befragungsergebnis dieser Key-Idea < 0.5 ist. In diesem Fall wird es als grundsätzlich legitim angesehen, die Key-Idea im Rahmen einer Pilotierung in der intendierten und ggf. angepassten Weise im Unterricht zu erforschen. Größere Mittelwerte oder die Häufung gelber bzw. roter Felder innerhalb einer Key-Idea-Spalte sprechen jedoch dafür, die Elementarisierung grundlegend zu hinterfragen und entsprechend des Design-Based-Research-Paradigmas bzgl. herausgearbeiteter Schwierigkeiten anzupassen.

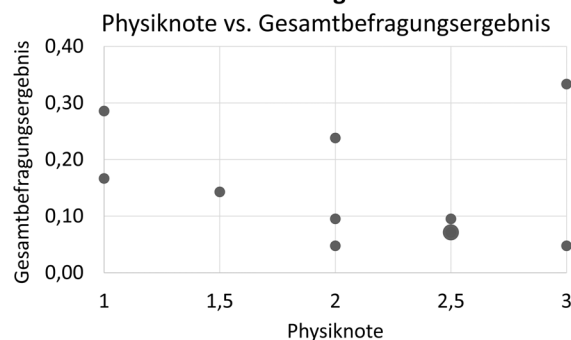
Die finalen Ergebnisse der Kodierung für jede der drei Befragungsphasen sind in Tabelle 3 dargestellt. Dabei sind für jeden Befragungsschritt ebenfalls die jeweiligen Zeilen- und Spaltenmittelwerte sowie jeweils ein linear gewichteter Interrater-Koeffizient (Cohen's Kappa κ) angegeben. Die Gesamtdurchschnittswerte pro Key-Idea sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Ein Streudiagramm zum Zusammenhang des Gesamtbefragungsergebnisses je Befragung zur jeweiligen Physiknote ist in Abbildung 4 dargestellt.

Tab. 3: Ergebnisse der einzelnen Befragungsschritte.

Interviewnummer	Key-Idea 1: (In-)Determinismus	Key-Idea 2: Elektronenspin als ZFS	Key-Idea 3: Superposition/Messprozess	Key-Idea 4: statistischer Charakter	Key-Idea 5: Verschränkung	Key-Idea 6: Dekohärenz	Key-Idea 7: Quantencomputer
Befragung nach Akzeptanz							
$\kappa_{\text{Akzeptanz}} = 0.92$ (95% – CI: [0.82; 1.00])							
01	0	0	0	0	0	0	0.00
02	0	0	0	0	0	0	0.00
03	0	0	0.5	0	0.5	0	0.29
04	0	0	0	0	0	0	0.00
05	0	0.5	0	0	0	1	0.29
06	0	0.5	0.5	0	0.5	0.5	0.36
07	0	0	0	0	0	0	0.00
08	0	0	0	0	0	0	0.00
09	0	0	0	0	0	0	0.07
10	0	0	0	0	0	0.5	0.07
11	0	0	0	0	0.5	0	0.07
	0.00	0.09	0.09	0.00	0.14	0.18	0.23
Paraphrasierung							
$\kappa_{\text{Paraphrasierung}} = 0.70$ (95% – CI: [0.56; 0.84])							
01	0	0	0	0	0	0	0.07
02	0	0	0.5	0.5	0	0	0.14
03	0	0.5	0	0	0.5	1	0.43
04	0	0	0	0.5	0	0	0.07
05	0	0.5	0	0	0	0.5	0.21
06	0	0	0	0	0	0	0.00
07	0	0	0	0	0	0.5	0.07
08	0	0	0.5	0	0	0.5	0.14
09	0	0.5	0	0	1	0	0.21
10	0	0.5	1	0.5	0.5	1	0.64
11	0	0.5	0	0	0	0	0.07
	0.00	0.23	0.18	0.14	0.18	0.32	0.27
Anwendungs-/Transferaufgabe							
$\kappa_{\text{Anwendung}} = 0.72$ (95% – CI: [0.55; 0.88])							
01	0	0	0	0	0	0.5	0.07
02	0.5	0	0	0	0	0.5	0.14
03	0	0	0	0	0	0.5	0.14
04	0	0	0	0	0	0	0.07
05	0.5	0	0	0	0	1	0.21
06	0	0	0	0	0	0	0.07
07	0	0	0.5	0	0	0.5	0.14
08	0	0	0.5	0	0	0	0.07
09	0	0	0	0	0	0.5	0.21
10	0	0	0.5	0	0.5	0.5	0.29
11	0	0	0	0	0	1	0.14
	0.09	0.00	0.14	0.00	0.05	0.45	0.27
Legende							
0 = gelungen 0.5 = befriedigend 1 = mangelhaft							

Tab. 4: Gesamtdarstellung nach Key-Ideas.

Schwerpunkt	Mittelwert
Key-Idea 1 Determinismus vs. Indeterminismus	0.03
Key-Idea 2 Elektronenspin als Zweizustandssystem	0.11
Key-Idea 3 Superposition und Messprozess	0.14
Key-Idea 4 statistischer Charakter	0.05
Key-Idea 5 Verschränkung	0.12
Key-Idea 6 Dekohärenz	0.32
Key-Idea 7 Grundidee eines Quantencomputers	0.26

Streudiagramm**Abb. 4:** Physiknote vs. Gesamtbefragungsergebnis.

6.2. Beantwortung der Forschungsfragen

6.2.1. FF 1: Inhaltlicher Vermittlungserfolg

Inwiefern konnten die angestrebten fachlichen Inhalte vermittelt werden?

Insgesamt kann festgehalten werden: Alle Key-Ideas lieferten im Schnitt uneingeschränkt gute bis befriedigende Vermittlungserfolge, gerade auch in Hinblick auf die Akzeptanz der vorgetragenen Erklärungen und Zugangsweisen. Insbesondere hinsichtlich der Paraphrasierungs- und Anwendungs-/Transferleistungen konnten vor allem für frühe Kapitel inkl. der Wesenszüge sehr zufriedenstellende Vermittlungsergebnisse festgestellt werden. Potentielle Schwierigkeiten in der Vermittlung liegen offenbar v. a. bei späteren Themen (Dekohärenz und Funktionsweise eines Quantencomputers), bei denen zuvor gelernte Konzepte und Phänomene vernetzt werden müssen und bei denen bei manchen der Befragten auch Ermüdungseffekte eine Rolle spielten.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass die Inhalte im Schnitt weitgehend erfolgreich vermittelt werden konnten und die prinzipielle Zugangsweise grundsätzlich in Hinblick auf kognitive Lernziele geeignet scheint. Es liegt dabei innerhalb der befragten Gruppe keine Evidenz für einen Zusammenhang zwischen Lernerfolg (gemessen an einem Gesamtmittelwert aus allen Befragungsschritten) und Zeugnisnoten in Physik vor.

6.2.2. FF 2: Lernschwierigkeiten

Mit welchen Lernschwierigkeiten ist bei der Durchführung des Konzeptes zu rechnen?

Beim Vergleich von Paraphrasierungsleistungen mit den Anwendungs-/Transferleistungen lässt sich feststellen, dass für Lernende das Sprechen über Quantenphysik oft eine wesentliche Schwierigkeit darzustellen scheint. Es zeigt sich, dass Konzepte häufig zumindest in ihren Grundzügen verstanden wurden, was sich in einer akzeptablen Transferleistung zeigt – allerdings konnten manche der Befragten dennoch nicht adäquat und v. a. auch nicht unter Nutzung von Fachsprache über diese Phänomene sprechen. Zwar müssen diese Ergebnisse im Rahmen der Interviewsituation und einer entsprechend sehr komprimierten

Interventionsphase gesehen werden, dennoch erscheint ein sprachsensibler Unterricht in diesem Licht umso wichtiger.

Eine kleinere und vereinzelte weitere Lernschwierigkeit stellt das Voraussetzen mathematischer Fachsprache im Bereich der Wachstumsvorgänge (exponentielles Wachstum) dar – nicht aber die Vorkenntnisse im Bereich der Stochastik/Statistik.

Außerdem wurde im Rahmen der Anwendungsaufgabe zum Thema „Dekohärenz“ deutlich, dass das Vorhandensein von Superpositionszuständen von einigen Befragten auf die Kenntnis bzw. Unkenntnis eines Beobachters über den Zustand eines Objektes zurückgeführt wurde. Superposition wurde in diesem Sinne im Rahmen intuitiv geprägter Argumentationsmuster also z. T. als subjektives und beobachterabhängiges Phänomen betrachtet, was zumindest im betrachteten Fall gleicher Messbasen fachlich unsauber ist.

Dieses Ergebnis ist in Hinblick auf Alltagserfahrungen nicht überraschend, unterstreicht aber nochmal die Notwendigkeit einer intensiven Diskussion dieses zentralen und zugleich kontra-intuitiven Phänomens.

Abschließend lässt sich sehr positiv festhalten, dass anders als bei vielen v. a. traditionellen Lehrkonzepten zur Quantenphysik weitere mechanistische und klassische Denkweisen bzw. ein Vermischen von klassischer Physik mit Quantenphysik kein beobachtetes Problem darstellten. Das genutzte Vorgehen (Sachstruktur ohne Wellenbegriff, Sprachsensibilität, explizite Diskussion von klassischer Physik und Quantenphysik, etc.) könnte damit geeignet zu sein, solche „traditionellen“ Probleme bei der Vermittlung von Quantenphysik in großen Teilen zu überwinden.

6.2.3. FF 3: Sicht der Lernenden

Wie schätzen die Lernenden das Vorgehen bei der Vermittlung insgesamt ein?

Die Lernenden schätzen das Vermittlungskonzept ganz überwiegend als positiv und gelungen ein. Sie gaben alle ein grundsätzliches Verständnis des Wesens der Quantenphysik an – wenngleich in Teilen mit kleineren Einschränkungen bzw. Wünschen. Der wesentliche Verbesserungsvorschlag der Befragten ist der Wunsch nach mehr Zeit für die Inhalte – ein sicher auch methodenbedingtes Phänomen, das v. a. der Interviewsituation geschuldet sein dürfte. Über einen längeren Zeitraum gestreckt können sich viele Befragte das Thema als Teil des Schulunterrichtes gut vorstellen.

Einschränkungen inhaltlicher Natur gab es im Wesentlichen beim Quantencomputer und der Dekohärenz als die „am herausforderndsten“ Themen.

Als hilfreich empfanden die Befragten u. a. die verwendeten einheitlichen Darstellungen, die Gliederung sowie verwendete Vereinfachungen.

Die Befragten fanden das Thema weitgehend „spannend“, „cool“ und „interessant“ (das sind die Formulierungen der Befragten).

6.2.4. FF 4: Vorwissen

Verfügen die Lernenden über relevantes Vorwissen für das Unterrichtskonzept?

Die Lernenden verfügen i. d. R. nicht über relevantes Vorwissen für die Unterrichtskonzeption. Oft ist der Begriff Quantenphysik selbst bekannt, und in Teilen vereinzelte Phänomene oder Anwendungen. Allerdings handelt es sich hier fast uneingeschränkt um bedeutungsleere Begriffe oder unreflektiertes Begriffswissen ohne inhaltliche Vernetzung. Für das Unterrichtskonzept ist also insgesamt kein konzeptuelles Vorwissen zu erwarten, allenfalls populärwissenschaftlich geprägtes Begriffswissen (z. B. Schrödingers Katze), das aufgegriffen werden kann.

6.3. Gesamteinschätzung

Insgesamt legitimieren die Ergebnisse der Akzeptanzbefragung eindeutig eine Erprobung des Konzeptes im Unterricht. Ein qualitatives und phänomenbasiertes Verständnis quantenphysikalischer Prinzipien bzw. Phänomene an Zweizustandssystemen und eine Vernetzung im Kontext des Quantencomputers scheint grundsätzlich entsprechend des vorgeschlagenen Vorgehens möglich zu sein.

Einschränkend muss jedoch beachtet werden, dass eine qualitative Befragung mit elf Teilnehmenden nur erste vorsichtige Tendenzen aufzeigen kann. Außerdem ist das relativ schwache Ergebnis im Anwendungsschritt bei der Key-Idea Dekohärenz im Wesentlichen durch inadäquate Vorstellungen zur Superposition zu erklären. In dieser Hinsicht sollte kritisch hinterfragt werden, ob die Anwendungsaufgabe zur Dekohärenz geeignet war, um den Lernerfolg für genau diese Key-Idea in ausreichendem Maße zu erheben.

Im Rahmen der Auswertung der Befragungen konnten dennoch Lernverläufe nachgezeichnet und potentielle Lernhürden hierdurch identifiziert werden. Z. T. gaben die Befragten auch von sich aus Hinweise für Veränderungen, die ihnen das Verständnis der Inhalte erleichtern könnten.

7. Ausblick

Auf Grundlage der Befragungsergebnisse wurden diverse Implikationen für Veränderungen am Unterrichtskonzept im Sinne eines Design-Based-Research-Zyklus abgeleitet, etwa kleinere strukturelle Verlaufsänderungen, eine Aufteilung des Kapitels zum Quantencomputer sowie die Integration von Aufgaben zur Übung von Fach- bzw. Unterrichtssprache. Zudem wurde festgestellt, dass das im Interview passiv zu den Wesenszügen erworbene Wissen wie erwartet eher träge ist, und die Anwendung im Bereich des Quantencomputing daher Probleme bereitet hatte. Darum wurde als Ersatz für nicht realisierbare

Realexperimente eine HTML-Simulation entwickelt, anhand der die Wesenszüge sowie das Thema Dekohärenz selbstständig exploriert und erarbeitet werden können - um träges Wissen damit potentiell zu minimieren.

Derzeit erfolgt eine weitere formative Evaluierung im regulären schulpraktischen Rahmen. Unter anderem auf Grundlage von Lehr- und Lerntagebüchern, praktischen Unterrichtserfahrungen, Lehrkräfteeinschätzungen, Reflexionen von Lernenden sowie auch Ergebnissen von Interviews für die Entwicklung der Erhebungsinstrumente wird das Konzept kontinuierlich angepasst und ausgeschärft. In Kombination und enger Verzahnung hierzu werden in wechselseitiger Beeinflussung auch die Erhebungsinstrumente für die Hauptstudie entwickelt.

Viele der Anpassungen, die auf Grundlage der Akzeptanzbefragungen vorgenommen wurden, erwiesen sich bisher als vorteilhaft. Im Rahmen des Pilotunterrichts in Kombination mit den abgeleiteten Veränderungen konnten manche Schwierigkeiten der Akzeptanzbefragungen, etwa das verhältnismäßig schwache Abschneiden der Dekohärenz im Akzeptanz- und Lernerfolg, in diesem Umfang nicht mehr beobachtet werden.

Die summative Evaluierung soll dann im Schuljahr 2023/24 mit einer vorläufig finalen Version des Unterrichtskonzeptes stattfinden.

8. Literatur

- Bitzenbauer, P. (2020). *Quantenoptik an Schulen. Studie im Mixed-Methods Design zur Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik*. Logos Verlag.
- Bitzenbauer, P. (2021). Effect of an introductory quantum physics course using experiments with heralded photons on preuniversity students' conceptions about quantum physics. *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.*, 17 (2). DOI: 10.1103/PhysRevPhysEduRes.17.020103.
- Burde, J.-P. (2018). *Konzeption und Evaluation eines Unterrichtskonzepts zu einfachen Stromkreisen auf Basis des Elektronengasmodells*. (Dissertation, Logos Verlag Berlin).
- Dresing, T. & Pehl, T. (2018). *Praxisbuch Interview, Transkription & Analyse. Anleitungen und Regelsysteme für qualitativ Forschende* (8. Aufl.). Eigenverlag. Abgerufen von <https://www.audiotranskription.de/downloads/#praxisbuch>
- Dür, W. & Heusler, S. (2014). Visualization of the Invisible: The Qubit as Key to Quantum Physics. *The Physics Teacher*, 52 (8), S. 489–492. DOI: 10.1119/1.4897588.
- Dür, W. & Heusler, S. (2016). The Qubit as Key to Quantum Physics Part II: Physical Realizations and Applications. *The Physics Teacher*, 54 (3), S. 156–159. DOI: 10.1119/1.4942137.
- Ferriz-Valero, A.; Østerlie, O.; García Martínez, S. & García-Jaén, M. (2020). Gamification in Physical Education: Evaluation of Impact on Motivation and Academic Performance within Higher Education. In: *International journal of environmental research and public health* 17 (12). DOI: 10.3390/ijerph17124465.
- Heise, H. (2014). *DPG-Studie zur Unterrichtsversorgung im Fach Physik und zum Wahlverhalten der Schülerinnen und Schüler im Hinblick auf das Fach Physik*. Deutsche Physikalische Gesellschaft, Bad Honnef.
- Hertel, I. & Grossmann, S. (2016). *Physik in der Schule*. Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V.
- Jung, W. (1992). Probing acceptance: A technique for investigating learning difficulties. In Duit, R. (Hrsg.), *Research in physics learning. Theoretical issues and empirical studies* (S. 278-295). Inst. für die Pädagogik der Naturwissenschaften an der Universität Kiel.
- Kalogiannakis, M.; Papadakis, S. & Zourmpakis, A.-I. (2021). Gamification in Science Education. A Systematic Review of the Literature. In: *Education Sciences* 11 (1), S. 22. DOI: 10.3390/educsci11010022.
- Küblbeck, J. & Müller, R. (2007). *Die Wesenszüge der Quantenphysik. Modelle, Bilder, Experimente* (3., unveränd. Aufl.). Aulis-Verl.
- Mayring, P. (2010). *Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken* (11., aktual. und überarb. Aufl.). Beltz (Pädagogik).
- Meyermann, A. & Porzelt, M. (2014). *Hinweise zur Anonymisierung qualitativer Daten. Version 1.1*. Leibniz-Institut für Bildungsforschung und Bildungsinformation.
- Müller, R. (2016). Quanteninformation. Ein neues Paradigma für den Quantenphysik-Unterricht? *Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule*, 65 (1), S. 4.
- Müller, R. & Wilhelm, T. (2021). Unterrichtskonzeptionen zur Quantenphysik. In: Thomas Wilhelm, Horst Schecker und Martin Hopf (Hg.): *Unterrichtskonzeptionen für den Physikunterricht: Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 335–368.
- Sadaghiani, H. R. & Munteanu, J. (2015). *Spin First instructional approach to teaching quantum mechanics in sophomore level modern physics courses*. Physics Education Research Conference, College Park, S. 287–290.

Schöne, M., & Pospiech, G. (2014). Die Verbesserung der Lehramtsausbildung im Bereich Quantenphysik. *PhyDid B - Didaktik Der Physik - Beiträge Zur DPG-Frühjahrstagung*. Abgerufen von <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/560>

Stadermann, H. K. E.; van den Berg, E. & Goedhart, M. J. (2019). Analysis of secondary school quantum physics curricula of 15 different countries: Different perspectives on a challenging topic. *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.*, 15 (1), S. 10130. DOI: 10.1103/PhysRevPhysEducRes.15.010130.

Ständige Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland & Humboldt-Universität zu Berlin (2020). *Bildungsstandards im Fach Physik für die Allgemeine Hochschulreife*. Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 18.06.2020. 1. Auflage. Köln: Carl Link Verlag.

Wiesner, H. & Wodzinski, R. (1996). Akzeptanzbefragungen als Methode zur Untersuchung von Lernschwierigkeiten und Lernverläufen. In Duit, R. & von Rhöneck, C. (Hrsg.): *Lernen in den Naturwissenschaften* (S. 250–274).