







universität  
wien

# DIPLOMARBEIT / DIPLOMA THESIS

Titel der Diplomarbeit / Title of the Diploma Thesis

„Quantenphysik in der Schule – Phänomenologie und  
Mathematik“

verfasst von / submitted by

Mag. (FH) Christian Desbalmes

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of  
Magister der Naturwissenschaften (Mag. rer. nat.)

Wien, 2016 / Vienna, 2016

Studienkennzahl lt. Studienblatt /  
degree programme code as it appears on  
the student record sheet:

A 190 406 412

Studienrichtung lt. Studienblatt /  
degree programme as it appears on  
the student record sheet:

Lehramtsstudium UF Mathematik UF Physik

Betreut von / Supervisor:

Doz. Dr. Franz Embacher



## Vorwort und Danksagung

Während meines Lehramtsstudiums an der Universität Wien wurde ich in den vergangenen vier Jahren in unterschiedlichen Lehrveranstaltungen mit der Quantenphysik konfrontiert. Die entsprechenden Vorlesungen und Übungen stellten für mich eine große Herausforderung dar. Die vorgestellte Theorie präsentierte sich als überaus unintuitiv und die Rechenbeispiele stellten sich als schwierig heraus.

Die Zeit an der Universität war auch das erste Mal, dass ich mich ernsthaft mit der Quantenphysik beschäftigen musste. In meiner Schulzeit wurde sie nur am Rande erwähnt, obwohl ich ein Oberstufenrealgymnasium mit naturwissenschaftlichem Schwerpunkt besucht habe. Damals wurde in der 8.Klasse der Schwerpunkt auf die spezielle Relativitätstheorie gelegt. Für die Quantenphysik verblieben nur wenige Unterrichtseinheiten, in denen das Doppelspaltexperiment mit Elektronen durchgenommen wurde. Im Rahmen meines fachbezogenen Praktikums in Physik habe ich auch einige Gespräche mit meiner Betreuungslehrerin bezüglich der Quantenphysik in der Schule geführt. Dabei habe ich das Gefühl bekommen, dass auch an dieser Schule das Thema Quantenphysik gerne gemieden wird.

Diese Gegebenheit führte zur forschungsleitenden Frage meiner Diplomarbeit: Ich wollte für mich persönlich klären, mit welchem Konzept man die Quantenphysik in der Sekundarstufe II unterrichten kann. Diese Fragestellung steht in einem wichtigen Zusammenhang mit meinem zukünftigen Beruf als Physiklehrer. Zusätzlich dazu wollte ich die Rolle der Mathematik in einem möglichen Unterrichtskonzept betrachten. Für mich war der mathematische Formalismus, den ich auf der Universität Wien gelernt habe, eine entscheidende Grundlage dafür, Quantenprozesse konzeptuell richtig zu verstehen. In der Schule hat man in der Regel allerdings nicht das notwendige mathematische Rüstzeug, um diesen Formalismus zu verwenden. Dadurch stellt sich die Frage, ob man die Quantenphysik in der Sekundarstufe II mit einem rein phänomenologischen Zugang überhaupt konzeptuell richtig vermitteln kann.

Die Erstellung dieser Diplomarbeit war eine große Herausforderung. Es erfordert viel Disziplin, eine wissenschaftliche Arbeit dieses Umfangs abzuschließen und dabei den roten Faden nicht aus den Augen zu verlieren. Zusätzlich dazu besteht ein gewisser Zeitdruck, nachdem die Arbeit vor einer möglichen Diplomprüfung fristgerecht abgegeben werden muss. Das zusammen verursachte bei mir eine gewisse psychische Belastung und im Nachhinein werde ich mich vermutlich nicht so gerne an die Monate Mai und Juni 2016 zurück erinnern. Damit man in einer so arbeitsintensiven Zeit nicht vollkommen wahnsinnig wird, ist es natürlich von großer Bedeutung, dass man in einem kollegialen und konstruktiven Umfeld arbeiten kann.

Daher möchte ich mich an dieser Stelle bei allen Personen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser wissenschaftlichen Arbeit unterstützt haben:

- Ich möchte mich bei Paul Hayden, Anita Resch und Lukas Perner für ihre fachliche Unterstützung bedanken. Trotz ihrer eigenen Prüfungsvorbereitungen haben sie sich die Zeit genommen, mich bei schwierigen Fragestellungen zur Quantenphysik zu unterstützen.
- Besonders bedanken möchte ich mich auch bei Daniel Scheinecker, mit dem ich im Rahmen unseres gemeinsamen Klettertrainings viele Gespräche über die Quantenphysik geführt habe. Dabei ergaben sich gute Ideen, die ich in meine Arbeit einbinden konnte. Darüber hinaus war Daniel auch maßgeblich bei der Erstellung des Titels dieser Diplomarbeit beteiligt.
- Ich möchte mich auch bei meiner Freundin Anna Kopf für ihre Geduld bedanken. Die letzten Monate waren sehr arbeitsintensiv für mich und dadurch war auch meine Aufmerksamkeit ihr gegenüber nicht so groß, wie sie es verdient hätte.
- Mein ganz besonderer Dank gilt aber vor allem meinem Betreuer Franz Embacher, für seine übermenschliche Unterstützung. Er ist mir mit vielen Anleitungen und Ratschlägen zur Seite gestanden und hat damit wesentlich zum Erfolg der Diplomarbeit beigetragen. Seine raschen Rückmeldungen zu meinen abgegebenen Teilkapiteln haben die fristgerechte Abschließung dieser Arbeit überhaupt erst möglich gemacht.

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort und Danksagung .....	I
Abbildungsverzeichnis .....	IV
Abkürzungsverzeichnis .....	V
1. Einleitung.....	1
1.1. Absicht und Zielsetzung der Arbeit.....	1
1.2. Forschungsleitende Frage und Methode .....	4
1.3. Zitiersystem.....	4
1.4. Struktur der Arbeit.....	4
2. Berechtigung der Quantenphysik in der Sekundarstufe II .....	6
2.1. Wesenszüge der Quantenphysik.....	6
2.2. Auswirkung auf Wissenschaft und Gesellschaft .....	12
2.3. Schülerinnen und Schüler zur Quantenphysik.....	15
2.4. Lehrpläne der Sekundarstufe II .....	19
2.5. Zusammenfassung.....	23
3. Zentrale Aspekte der Quantenphysik – Phänomenologie.....	24
3.1. Stand der Forschung.....	25
3.2. Übergang der klassischen Physik zur Quantenphysik .....	28
3.3. Begriffsbestimmung: Präparation, Zustand, Messung .....	34
3.4. Fähigkeit zur Interferenz.....	38
3.5. Stochastische Vorhersagbarkeit.....	44
3.6. Der quantenphysikalische Messprozess.....	47
3.7. Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation .....	50
3.8. Zusammenfassung.....	53
4. Zentrale Aspekte der Quantenphysik – Mathematik.....	54
4.1. Die Ultraviolett-Katastrophe.....	55
4.2. Quantitative Beschreibung von Quantensystemen .....	58
4.3. Schrödingers Katzenparadoxon – Dekohärenztheorie.....	63
4.4. Zusammenfassung.....	67
5. Schluss.....	68

6. Literaturverzeichnis.....	70
7. Anhang.....	72
7.1. Interviews.....	72
7.2. Zusammenfassung/Abstract.....	80

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Überlappung ausgewählter Wissenschaftsgebiete mit der Quantenphysik .....	13
Abbildung 2 Struktur des österreichischen Bildungssystems bis zur Reifeprüfung .....	19
Abbildung 3 Struktur des Basiskurses – Münchner Unterrichtskonzept.....	26
Abbildung 4 Evaluierung des Münchner Unterrichtskonzepts .....	27
Abbildung 5 Photoeffekt – Prinzipskizze .....	29
Abbildung 6 Photoeffekt – Experimenteller Aufbau .....	30
Abbildung 7 Emissionsspektren .....	32
Abbildung 8 Linienspektren – Experimenteller Aufbau .....	33
Abbildung 9 Linienspektrum Wasserstoff .....	33
Abbildung 10 Präparation - Klassisch.....	35
Abbildung 11 Präparation von Eigenschaften.....	36
Abbildung 12 Strahlteiler .....	37
Abbildung 13 Elektronenbeugungsröhre mit Beugungsmuster .....	39
Abbildung 14 Doppelspaltexperiment – Simulationsaufbau.....	41
Abbildung 15 Interferenzmuster Doppelspalt.....	42
Abbildung 16 Einzelspaltverteilungen.....	42
Abbildung 17 Summe der Einzelspaltverteilungen – Interferenzmuster.....	43
Abbildung 18 Allmählicher Aufbau des Doppelspalt Interferenzmusters.....	44
Abbildung 19 Das Mach-Zehnder-Interferometer - Prinzipskizze.....	45
Abbildung 20 Doppelspalt mit Messung an den Spalten.....	48
Abbildung 21 Doppelspalt mit zweimaliger Messung an den Spalten .....	48
Abbildung 22 Einfluss des Hohlraumpaars auf das Interferenzmuster.....	49
Abbildung 23 Präparierung der Ortseigenschaft eines Lasers in y-Richtung .....	51
Abbildung 24 Aufweitung des Laserstrahls an einem engen Spalt .....	52
Abbildung 25 Ultraviolett-Katastrophe .....	56
Abbildung 26 Mach-Zehnder-Interferometer – Präparierung, Zustand, Messung .....	59
Abbildung 27 Wahrscheinlichkeitsinterpretation am Doppelspalt.....	61
Abbildung 28 Wellenfunktion $\psi$ für ein Atom im Doppelspaltexperiment .....	64
Abbildung 29 Interferenzerscheinungen bei verschränkten Quantenobjekten .....	66



## Abkürzungsverzeichnis

AHS	allgemein bildende höhere Schulen
BAKIP	Bildungsanstalten für Kindergartenpädagogik
BMHS	berufsbildende mittlere und höhere Schulen
DNA	deoxyribonucleic acid
GPS	global positioning system
HTL	höhere technische Lehranstalten
NMR	nuclear magnetic resonance
PET	positron emission tomography
UV	ultraviolett



# 1. Einleitung

## 1.1. Absicht und Zielsetzung der Arbeit

Im Allgemeinen kann man davon ausgehen, dass der Mensch bestrebt ist, die Welt, in der er lebt, so gut wie möglich zu verstehen. Dieses Verständnis umfasst eine Vielzahl unterschiedlicher Aspekte. Die Physik als Naturwissenschaft hat sich auf einen dieser Aspekte spezialisiert. Als empirische Wissenschaft hat sie sich zum Ziel gesetzt, die grundlegenden Phänomene der Natur durch physikalische Theorien möglichst exakt zu beschreiben. Die Sprache, welche in der Physik zur Beschreibung dieser Gesetzmäßigkeiten verwendet wird, ist die Mathematik. An dieser Stelle ist auch anzumerken, dass in der Physik die Frage nach dem »Warum« nicht gestellt wird, und somit grenzt sie sich von der philosophischen Disziplin der Metaphysik ab.

Die Naturphänomene, welche in der Physik beschrieben werden, zeigen sich dabei oft als überaus erstaunlich und alles andere als intuitiv. Es ist faszinierend, wieviel unglaublicher sich das Universum präsentiert, als alles, was man sich ausdenken könnte. Vor allem in der jüngeren Zeit der Geschichte der Physik wurden sensationelle Entdeckungen gemacht, die unser Verständnis der Welt maßgeblich verändert haben:<sup>1</sup>

*„Die zwei überragenden Errungenschaften der letzten hundert Jahre sind die »Quantentheorie«, unser Bild von den Atomen und ihren Bausteinen, und Einsteins [Ableitung der]<sup>2</sup> »allgemeine Relativitätstheorie«, unser Bild von Raum und Zeit und von der Gravitation.“<sup>3</sup>*

Die vorliegende Diplomarbeit beschäftigt sich in weiterer Folge ausschließlich mit der Quantenphysik. Diese stellt eine der Säulen der modernen Physik dar. Ohne ihren theoretischen Hintergrund wären viele Technologien, die heute als selbstverständlich genommen werden, nicht realisierbar. Sie ist Grundlage für Computer, Smartphones, Lasergeräte und Kernreaktoren.<sup>4</sup>

In dieser Hinsicht stellt die Quantenphysik also einen faszinierenden und relevanten Bereich der Physik dar. Im Sinne der Allgemeinbildung<sup>5</sup>, gebührt ihr damit ein unbestreitbarer Platz in den österreichischen Lehrplänen der allgemein bildenden höheren Schulen (AHS), sowie der berufsbildenden mittleren und höheren Schulen (BMHS) mit entsprechendem Schwerpunkt.

---

<sup>1</sup> Vgl. Chown (2013), S. 7f.

<sup>2</sup> Ergänzung durch den Verfasser.

<sup>3</sup> Chown (2013), S. 7f.

<sup>4</sup> Vgl. ebd. S. 8.

<sup>5</sup> Anm. des Verfassers: Allgemeinbildung ist die Gewinnung von Grundkompetenzen in möglichst allen Bereichen des Lebens für die kritische Auseinandersetzung mit der gesamten physischen und geistigen Wirklichkeit des Lebens. Vgl. Olechowski (1997), S. 368.

In der österreichischen Sekundarstufe I spielt die Quantenphysik allerdings nur eine untergeordnete Rolle. Es ist in dieser Schulphase nicht fest vorgeschrieben, sie zu unterrichten. Die Formulierung des Lehrplans der AHS Unterstufe beziehungsweise der neuen Mittelschule lässt den Lehrpersonen aber ein gewisses Maß an Freiheit. Bei einigen Themengebieten, wie zum Beispiel »Alle Körper bestehen aus Teilchen«, »Die Welt des Sichtbaren«, »Das radioaktive Verhalten von Materie«, sowie bei den Erweiterungsbereichen, wäre es an sich denkbar, zentrale Aspekte der Quantenphysik zu unterrichten. Diese Entscheidung liegt jedoch bei der jeweiligen Lehrperson.<sup>6</sup>

Der Grund für diese untergeordnete Rolle basiert auf der Schwierigkeit, dieses komplexe Thema zu unterrichten. Das vollständige Verständnis der Quantenphysik basiert auf ihrer mathematischen Formulierung. So stellen zum Beispiel Begriffe wie Überlagerung, Unbestimmtheit, Verschränkung von Zuständen und Dekohärenz einen entscheidenden Unterschied zur klassischen Physik dar, lassen sich jedoch erst im mathematischen Rahmen voll erfassen. Darüber hinaus präsentieren sich viele der zentralen Aspekte der Quantenphysik auch völlig gegen die eigene Intuition gerichtet.<sup>7</sup> Niels Bohr bringt es mit der folgenden Aussage auf den Punkt:

*„Wer von der Quantenphysik nicht schockiert ist, der hat sie nicht verstanden.“<sup>8</sup>*

Unter der Betrachtung der Komplexität der Quantenphysik stellt sich natürlich die berechtigte Frage, an welcher Stelle der Schullaufbahn man am besten die zentralen Ideen dieser modernen Theorie vermitteln soll. Soll sie etwa einen fixen Platz in den österreichischen Pflichtschulen haben, oder soll das Themengebiet erst im Rahmen der Hochschulreife, beziehungsweise in BMHS mit entsprechendem Schwerpunkt unterrichtet werden?

In jedem Fall muss ein Kompromiss getroffen werden, welche Aspekte in welchem Umfang durchgenommen werden, denn die Unterrichtszeit, die in der Schule zur Verfügung steht, ist ebenso beschränkt, wie die zur Verfügung stehende Mathematik. Im Zuge der Unterrichtsplanung und der Herausarbeitung von Kernkompetenzen gilt es immer Schwerpunkte zu bestimmen. In dieser Hinsicht ist auch das Spannungsfeld zwischen Bildung und Ausbildung zu betrachten, welches je nach Bildungsziel der Schule natürlich unterschiedlich zu betrachten ist.

---

<sup>6</sup> Vgl. BGBl. II Nr. 185/2012, zuletzt geändert durch BGBl. II Nr. 174/2015, Anlage 1, Sechster Teil, Physik.

<sup>7</sup> Vgl. Pospiech (2016), S. 33.

<sup>8</sup> Aussage des dänischen Physikers Niels Bohr.

Eine genauere Beantwortung der Frage, wie man die Quantenphysik unterrichten soll, bedarf einer Differenzierung nach unterschiedlichen Schulformen. Je nach Schulform ergeben sich verschiedene Rahmenbedingungen, welche unter anderem die zeitlichen Ressourcen betreffen, die Ausstattung des Physiklabors, aber auch das mathematische Rüstzeug der Schülerinnen und Schüler, auf das zurückgegriffen werden kann. Eine weitere Rolle spielt natürlich auch das Bildungsziel der Schule.

Das Spektrum der unterschiedlichen Schulformen in Österreich, welches in Bezug auf dieses Thema relevant ist, ist dabei sehr weit gefächert und reicht von den Bildungsanstalten für Kindergartenpädagogik (BAKIP) über die AHS bis hin zu den höheren technischen Lehranstalten (HTL).

Je nach Schulform benötigt man also unterschiedliche Konzepte, um die zentralen Begriffe der Quantenphysik zu unterrichten. Es gilt dabei sicherlich folgenden Grundsatz zu beachten: Man soll den Schülerinnen und Schülern einen Zugang zu den zentralen Begriffen ermöglichen, der zum einen konzeptuell korrekt ist und zum anderen aber die Mathematik möglichst reduziert.<sup>9</sup> Diesen Grundsatz sollte man auch befolgen, wenn man generell mehr mathematische Mittel und mehr Zeit zu Verfügung hat, wie das zum Beispiel bei den HTL der Fall ist.

Im Hinblick auf die Merkmale von gutem Unterricht spielt nämlich die Methodenvielfalt eine bedeutende Rolle, und daher sollte man unter Berücksichtigung des Reichtums der Darstellungstechniken und der Vielfalt von Handlungsmustern darauf achten, den Unterricht möglichst abwechslungsreich zu gestalten.<sup>10</sup> Das bedeutet, dass die verwendete Mathematik beim Unterrichten der Quantenphysik nicht zu dominant sein darf, und dass man versuchen sollte, die wesentlichen Aspekte auch mit Hilfe anderer Methoden, wie zum Beispiel durch einen phänomenologischen Ansatz oder auch durch Experimente, Projektarbeiten und Spiele zu vermitteln.

Es muss ein angestrebtes Ziel sein, die Faszination und die Motivation der Schülerinnen und Schüler in Bezug auf das Thema Quantenphysik möglichst gut zu erhalten. Schlussendlich gilt folgender Grundsatz:

*"Lehren heißt, ein Feuer entfachen, und nicht, einen leeren Eimer füllen."<sup>11</sup>*

---

<sup>9</sup> Vgl. Pospiech (2016), S. 33.

<sup>10</sup> Vgl. Meyer (2011), S. 74ff.

<sup>11</sup> Aussage des griechischen Philosophen Heraklit von Ephesos.

## 1.2. Forschungsleitende Frage und Methode

Unter Berücksichtigung der oben genannten Problemstellung ergibt sich folgende Forschungsleitende Frage:

- **Wie kann Schülerinnen und Schülern der Sekundarstufe II ein Zugang zu den zentralen Begriffen der Quantenphysik ermöglicht werden, der zum einen konzeptuell korrekt ist und zum anderen mit möglichst wenig mathematischem Formalismus auskommt?**

Ausgehend von dieser Fragestellung leitet sich für diese Diplomarbeit die nachfolgende These ab:

- **These:** Es kann ein Unterrichtskonzept der Quantenphysik für die Sekundarstufe II entwickelt werden, welches zum Großteil auf phänomenologische Methoden zurück greift, somit nur ein Minimum an mathematischen Formalismen benötigt, und dennoch einen möglichst exakten Zugang zu den zentralen Begriffen ermöglicht.

Es ist an dieser Stelle anzumerken, dass die gewählte forschungsleitende Frage schon von vielen Autoren bearbeitet worden ist. So wurde zum Beispiel von Rainer Müller und Hartmut Wieser das »Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik« ausgearbeitet, welches ein bestehendes Konzept zur Unterrichtung der Quantenphysik in der Sekundarstufe II darstellt.

Die vom Verfasser gewählte Methodik in dieser Diplomarbeit ist daher ein qualitativer, empirisch-analytischer Forschungsansatz, der vor allem auf eine Aufarbeitung der bestehenden Fachliteratur abzielt. Zusätzlich werden Interviews mit einer Lehrperson, sowie mit Schülerinnen und Schülern der Sekundarstufe II geführt, um zu verwertbaren Erkenntnissen zu gelangen und die forschungsleitende Frage aus Sicht des Verfassers zu beantworten.

## 1.3. Zitiersystem

Als Zitiersystem wird das geisteswissenschaftliche System gewählt. Textstellen, welche kursiv formatiert und unter Anführungszeichen gesetzt sind, sind als wortwörtliche Zitate anzusehen. Die Abkürzung „Vgl.“ (Vergleich) in der Fußnote bedeutet, dass der dazugehörige Textbereich mit der unmittelbar nachstehend angeführten Quelle verglichen wird und somit die Argumentation des Verfassers unterstreicht.

## 1.4. Struktur der Arbeit

Im Zuge der Beantwortung der forschungsleitenden Frage soll zu Beginn der Arbeit die grundlegende Angelegenheit geklärt werden, welche Rechtfertigung für die Aufnahme der Quantenphysik in den Lehrpläne der österreichischen Sekundarstufe II überhaupt besteht.

Als erster Schritt wird dabei aufgezeigt, welche zentralen Wesenszüge die Quantenphysik so besonders machen und von der klassischen Physik unterscheiden. Dabei stützt sich der Verfasser vor allem auf das Werk »Wesenszüge der Quantenphysik – Modelle, Bilder und Experimente« von Josef Küblbeck und Rainer Müller. Nach dieser Differenzierung des Begriffs der Quantenphysik wird in einem weiteren Schritt die Relevanz dieser Theorie für die Wissenschaft und die Gesellschaft präsentiert. Dieser Abschnitt bezieht sich dabei auf Erkenntnisse aus dem Werk »Quantenphysik in der Nanowelt« von Hans Lüth. Zusätzlich dazu werden Interviews mit Schülerinnen und Schülern der 11. und 12. Schulstufe herangezogen, um festzustellen, ob bei diesen überhaupt ein Interesse besteht, Quantenphysik zu lernen. Abschließend wird dann noch betrachtet, in welcher Form die Quantenphysik in den Lehrplänen der österreichischen Sekundarstufe II derzeit verankert ist.

Das darauf folgende Kapitel 3 bildet dann den eigentlichen Kern dieser Diplomarbeit. Es ist vom Verfasser angedacht, dass der Inhalt dieses Kapitels als Grundlage für ein Unterrichtskonzept der Quantenphysik in der Sekundarstufe II verwendet werden kann. Als Ausgangspunkt des Kapitels wird daher der derzeitige Stand der Forschung herangezogen. Dabei bezieht sich der Verfasser auf das »Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik« von Rainer Müller und Hartmut Wieser. Dieses Konzept wurde bereits in Deutschland als Pilotprojekt getestet und evaluiert. In weiterer Folge werden zentrale Begriffe der Quantenphysik präsentiert, die aus Sicht des Verfassers mit einem phänomenologischen Ansatz konzeptuell richtig vermittelt werden können. Die zentralen Aspekte, die dabei betrachtet werden, basieren auf den zuvor herausgearbeiteten Wesenszügen. Die einzelne Begriffe werden nacheinander, jeweils in einem eigenen Unterkapitel fachdidaktisch abgearbeitet. Im Zentrum jedes Unterkapitels stehen unterschiedliche Experimente, Computersimulationen oder auch Gedankenexperimente, mit denen die zentralen Aspekte qualitativ und anschaulich vermittelt werden können.

Im Kapitel 4 werden im Gegensatz dazu die Grenzen eines rein phänomenologischen Zugangs zur Quantenphysik aufgezeigt, indem Beispiele von zentralen Aspekten gebracht werden, deren konzeptuell richtiges Verständnis ein mathematisches Rüstzeug benötigt, welches den Schulstoff in der Regel übersteigt. Dieser Abschnitt ist auch als Ausblick gedacht. Der im Kapitel 3 beschriebene phänomenologische Zugang zu bestimmten zentralen Begriffen der Quantentheorie kann nur als Verständnisbasis dienen. Über diese Basis hinaus gibt es allerdings noch viele faszinierende Phänomene der Quantenphysik, die man nur mit einem entsprechenden mathematischen Formalismus umfassend verstehen kann.

Abschließend wird das Ergebnis dieser wissenschaftlichen Arbeit mit dem derzeitigen Stand der Forschung verglichen. Zusätzlich dazu wird noch die Meinung einer Expertin bei der Unterrichtung von Quantenphysik in der Sekundarstufe II eingeholt, um eine abschließende Reflexion durchzuführen, wie man die Quantenphysik in der Sekundarstufe II unterrichten kann.

## 2. Berechtigung der Quantenphysik in der Sekundarstufe II

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Fragestellung, warum die Quantenphysik überhaupt eine Berechtigung im Schulunterricht der Sekundarstufe II hat, wenn sie sich doch so unintuitiv präsentiert und ihre vollständige Erfassung ein großes mathematisches Repertoire benötigt. Schlussendlich kann nicht jedes Teilgebiet der Physik in der österreichischen Sekundarstufe II unterrichtet werden, denn sonst würde man auch Teile der String-Theorie im Lehrplan antreffen.

Um diese Fragestellung zu beantworten, wird wie folgt vorgegangen: Zu Beginn wird aufgezeigt, welche Gegebenheiten die Quantenphysik so besonders machen, um die bedeutsamen Unterschiede dieser Theorie zur klassischen Physik hervorzuheben. Dazu werden fundamentale Wesenszüge der Quantenphysik herausgearbeitet. Nach dieser Differenzierung des Begriffs der Quantenphysik wird in einem weiteren Schritt die Relevanz dieser Theorie für unsere heutige Gesellschaft präsentiert, indem Auswirkungen auf den wissenschaftlichen Fortschritt, sowie auf das öffentliche und private Leben, betrachtet werden. Zusätzlich dazu werden Interviews mit Schülerinnen und Schülern der 11. und 12. Schulstufe herangezogen. Dabei soll geklärt werden, ob bei diesen überhaupt ein Interesse besteht, Quantenphysik zu lernen. Abschließend wird dann noch betrachtet, in welcher Form die Quantenphysik in den Lehrplänen der österreichischen Sekundarstufe II verankert ist.

### 2.1. Wesenszüge der Quantenphysik

Zunächst gilt es zu klären, was das besondere an der Quantenphysik ist und welche zentralen Aspekte sie von der klassischen Physik unterscheidet. Dabei bezieht sich dieser Abschnitt vor allem auf das Werk: »Wesenszüge der Quantenphysik – Modelle, Bilder und Experimente« von Josef Küblbeck und Rainer Müller.

Als Ausgangspunkt betrachten wir Experimente mit Quantenobjekten. Diese führen zu Ergebnissen, die nicht zu unseren Alltagsvorstellungen von klassischen Objekten passen. Man kann diese Ergebnisse auch als Wesenszüge betrachten.<sup>12</sup> In weiterer Folge werden sie nun nacheinander beschrieben.

### Quantisierung

*„Beobachtungen an makroskopischen Systemen führen im Allgemeinen zu kontinuierlichen Messergebnissen. Im atomaren und subatomaren Bereich können physikalische Messgrößen jedoch oftmals nur diskrete Werte annehmen.“<sup>13</sup>*

---

<sup>12</sup> Vgl. Küblbeck und Müller (2003), S. 6f.

<sup>13</sup> Wagner (2012), S. 485.



Historisch betrachtet ging die klassische Physik vom Kontinuitätsprinzip aus. Demnach macht die Natur keine Sprünge, sondern ist kontinuierlich. Dieses Prinzip hatte die Naturforschung bis zum Ende des 19. Jahrhunderts erfolgreich geleitet und findet sich auch in den Gleichungen der Hydrodynamik und der Elektrodynamik wieder.<sup>14</sup>

Unterschiedliche experimentelle Befunde des späten 19. und frühen 20. Jahrhunderts lieferten jedoch Ergebnisse, die darauf hinwiesen, dass Messgrößen im atomaren Bereich nur ganz bestimmte, quantisierte Werte annehmen können. Paul Wagner verweist dazu unter anderem auf folgende Beispiele:

- Um zu einer realistischen Beschreibung der spektralen Intensitätsverteilung der Wärmestrahlung zu gelangen, postulierte Planck im Jahr 1900 eine Quantisierung der Energie elektromagnetischer Oszillatoren.
- Die von Hertz und Hallwachs 1887 durchgeführten Experimente zum photoelektrischen Effekt lieferten eine Grundlage für die 1905 von Einstein postulierte Teilchennatur elektromagnetischer Wellen.
- Die seit 1885 bekannten diskreten optischen Spektralserien veranlassten Bohr zur Annahme diskreter Energiezustände der Atome, was 1913 durch Experimente von Franck und Hertz auch direkt bestätigt wurde. Im gleichen Jahr hat Bohr, aufbauend auf drei Postulaten, ein Atommodell aufgestellt, das die Berechnung der diskreten Elektronenenergien in Atomen in Übereinstimmung mit den experimentellen Spektralserien ermöglicht.<sup>15</sup>

## Stochastische Vorhersagbarkeit

*„In der Quantenphysik können Einzelereignisse im Allgemeinen nicht vorhergesagt werden. Bei vielen Wiederholungen ergibt sich jedoch eine Verteilung, die – bis auf stochastische Schwankungen – reproduzierbar ist.“<sup>16</sup>*

Dieser Wesenszug der Quantenphysik lässt sich zum Beispiel bei instabilen Atomkernen beobachten, die eine bestimmte Halbwertszeit besitzen. Wenn man einen einzelnen Kern betrachtet, dann kann man keine Aussage darüber treffen, wann er zerfallen wird. Aber desto mehr Kerne man beobachtet, desto besser stimmt die Wahrscheinlichkeitsaussage, dass nach Ablauf der Halbwertszeit die Hälfte der Kerne zerfallen sind, mit dem Experiment überein.<sup>17</sup>

---

<sup>14</sup> Vgl. Rupp (2013), S. 74f.

<sup>15</sup> Vgl. Wagner (2012), S. 15.

<sup>16</sup> Küblbeck und Müller (2003), S. 27.

<sup>17</sup> Vgl. ebd. S. 27.

Ein weiteres Beispiel für diese Eigenschaft liefert das Doppelspaltexperiment mit einzelnen Elektronen. Man könnte das Experiment zu einem beliebigen Zeitpunkt stoppen und versuchen, den Nachweisort des nächsten Elektrons am Schirm vorherzusagen. Diese Vorhersage wäre reine Glückssache. Allerdings lässt sich die Verteilung, die sich nach vielen Wiederholungen des Experiments ergibt, innerhalb stochastischer Schwankungen reproduzieren.<sup>18</sup>

Der genannte Aspekt der Quantenphysik verweist auf einen intrinsischen Zufall und ist nicht mit Vorgängen der klassischen Physik zu verwechseln, deren Ausgang scheinbar auch vom Zufall bestimmt ist, wie zum Beispiel der Würfelwurf. Wären beim »klassischen« Würfelwurf alle Versuchsbedingungen einschließlich der Anfangsbedingungen nur genau genug bekannt, dann könnte man mit Newtons Gesetzen im Prinzip die Augenzahl vorhersagen.<sup>19</sup>

Diese Tatsache bringt auch philosophische Konsequenzen mit sich. Aufgrund der Unvorhersagbarkeit von bestimmten Einzelereignissen wird die Theorie des Determinismus im Weltbild der Physik wiederlegt. Somit muss man auch die Idee des sogenannten Laplace'schen Dämons verwerfen. Laut einer These von Laplace stellt dieser Dämon einen überragenden Geist dar, der den Bewegungszustand der Materie im Großen und Kleinen zu jedem Zeitpunkt kennt und der in der Lage ist, die Auswirkungen der vielfältigen Wechselwirkungen zu berechnen und somit die Zukunft quantitativ zu bestimmen.<sup>20</sup>

Nach Küblbeck und Müller kann dieser Unterschied zwischen klassischer Physik und Quantenphysik wie folgt formuliert werden: Während in der klassischen Mechanik der Ausgang von Experimenten grundsätzlich determiniert ist, ist bei quantenphysikalischen Ereignissen der Ausgang prinzipiell vom Zufall bestimmt.<sup>21</sup>

## Fähigkeit zur Interferenz

*„Auch einzelne Quantenobjekte können zu einem Interferenzmuster beitragen. Voraussetzung ist, dass es für das Eintreten des gleichen Versuchereignisses mehr als eine klassisch denkbare Möglichkeit gibt.“<sup>22</sup>*

Es gibt eine große Anzahl von Quantenexperimenten, die Interferenzmuster aufweisen. Diese können auch dann beobachtet werden, wenn sich stets nur ein einzelnes Quantenobjekt in der Versuchsanordnung befindet. Bei jedem dieser Experimente gibt es für das Eintreten eines bestimmten Versuchsergebnisses mehrere »klassisch denkbare Möglichkeiten«.

---

<sup>18</sup> Vgl. ebd. S. 27.

<sup>19</sup> Vgl. ebd. S. 28.

<sup>20</sup> Vgl. Spektrum.de [Zugriff am 17.05.2016].

<sup>21</sup> Vgl. Küblbeck und Müller (2003), S. 29.

<sup>22</sup> Ebd. S. 30.

Als Beispiel kann wieder das Doppelspaltexperiment mit Elektronen dienen: Wenn man einzelne Elektronen auf den Doppelspalt schießt, dann entstehen im Laufe der Zeit Streifen am Detektorschirm, die man beim Sammeln der Detektionspunkte von vielen Elektronen erhält. »Klassisch denkbare Möglichkeiten« wären in diesem Fall, dass das Elektron durch den rechten oder den linken Spalt zum Detektor gelangt. Verschließt man einen der beiden Spalten, so gibt es nur noch eine Möglichkeit und es werden keine Streifen am Schirm beobachtet.<sup>23</sup>

Es ist an dieser Stelle noch zu klären, warum in diesem Abschnitt zur Interferenz immer von »klassisch denkbaren Möglichkeiten« die Rede ist. Das liegt daran, dass es im Fall der Interferenz von Quantenobjekten nicht möglich ist, diesen die Eigenschaft »Weg« zuzuordnen. Sie sind bezogen auf diese Eigenschaft unbestimmt. Tatsächlich führt jede Vorstellung darüber, wie das Objekt zum Detektor gelangt, zu Widersprüchen. So ist zum Beispiel auch die Vorstellung, dass sich das Quantenobjekt teilt und mehrere Möglichkeiten gleichzeitig realisiert, falsch. Das ist auch der Grund, warum die »klassisch denkbare Möglichkeiten« bisher immer unter Anführungszeichen gesetzt worden sind. Jede Vorstellung darüber, wie bei Interferenz ein Quantenobjekt von der Quelle zum Detektor gelangt, ist falsch. Das Einzige, worüber Aussagen gerechtfertigt sind, sind Messergebnisse. Es besteht allerdings ein Vorteil darin, weiterhin über »klassisch denkbare Möglichkeiten« zu sprechen, da es deren Analyse erlaubt, das Auftreten von Mustern vorherzusagen.<sup>24</sup>

## Eindeutige Messergebnisse

*„Messergebnisse sind stets eindeutig, auch wenn sich das Quantenobjekt in einem Zustand befindet, der unbestimmt bezüglich der gemessenen Größe ist. Eine Wiederholung der Messung am gleichen Quantenobjekt führt zum gleichen Ergebnis, wenn das Quantenobjekt nicht zwischendurch anderweitig beeinflusst wurde.“<sup>25</sup>*

Dieser Wesenszug der Quantenphysik lässt sich bei Polarisationsmessungen veranschaulichen: Ein Photon, das die Polarisierungseigenschaft  $\varphi = 45^\circ$  hat, ist weder senkrecht ( $\varphi = 0^\circ$ ), noch waagrecht ( $\varphi = 90^\circ$ ) polarisiert. Es befindet sich in einem unbestimmten Zustand bezüglich einer Messung mit einem Polarisationsfilter mit  $\varphi = 0^\circ$ . Es ist unbestimmt, ob es absorbiert oder durchgelassen wird. Aber das Messergebnis ist klar und deutlich, wenngleich nicht vorherbestimmt. Entweder das Photon wird durchgelassen, oder es wird absorbiert. Außerdem ist das Messergebnis in der Folge reproduzierbar. Wenn das Photon durchgelassen wird, dann wird es von jedem weiteren Filter mit Orientierung  $\varphi = 0^\circ$  ebenfalls durchgelassen.<sup>26</sup>

---

<sup>23</sup> Vgl. ebd. S. 30.

<sup>24</sup> Vgl. ebd. S. 32.

<sup>25</sup> Ebd. S. 38.

<sup>26</sup> Vgl. ebd. S.39f.

Das Photon hat also eine neue Polarisierungseigenschaft. Es ist durch die Messung unpräpariert worden. Der Wesenszug zeigt sich auch beim Doppelspaltexperiment mit den Elektronen. Vor der Detektion ist der Ort des Atoms unbestimmt. Die Detektion ist eine Ortsmessung und liefert ein bestimmtes Ergebnis.

Was in Experimenten beobachtet wird, lässt sich auch wie folgt formulieren: Wenn ein Quantenobjekt bezüglich einer Eigenschaft in einem unbestimmten Zustand ist, so wird es durch eine Messung auf diese Eigenschaft unpräpariert und es befindet sich unmittelbar nach der Messung in einem Zustand, in dem diese Eigenschaft bestimmt ist.<sup>27</sup>

## Komplementarität

*„Interferenzmuster und Unterscheidbarkeit der klassisch denkbaren Möglichkeiten schließen sich aus.“<sup>28</sup>*

Als experimentelle Grundlage dieses Aspekts der Quantenphysik kann man wieder auf den Doppelspalt mit Elektronen verweisen: Das Experiment zeigt, dass man mit einer Ortsmessung an den Spalten ein völlig anderes Ergebnis erhält, als wenn man keine Ortsmessung durchführt. Bei Ortsmessungen an den Spalten erhält man an Stelle des Interferenzmusters die Summe der Einzelspaltverteilungen.<sup>29</sup>

Ein Interferenzmuster kann also nicht beobachtet werden, wenn die »klassisch denkbaren Möglichkeiten« unterscheidbar sind. Um diese Unterscheidung möglich zu machen, benötigt man eine Information irgendeiner Art, die man dann diesen »klassisch denkbaren Möglichkeiten« zuordnen kann. Es ist dabei anzumerken, dass es nicht darauf ankommt, dass diese Information tatsächlich ausgelesen wird. Die Auslesung muss nur zum Zeitpunkt der Detektion des Quantenobjekts prinzipiell möglich sein. Man kommt somit zum Ergebnis, dass die gesamte Messapparatur das Versuchsergebnis beeinflusst und dass bereits die Möglichkeit zur Messung sich entscheidend auf den Zustand des Quantenobjekts auswirkt.<sup>30</sup>

In den vergangenen Jahren hat man auch untersucht, was bei unzuverlässiger Zuordnungsinformation beobachtet werden kann. Es zeigt sich dabei folgender Grundsatz: Je zuverlässiger die Zuordnungsinformation gewonnen werden kann, umso weniger zeigt sich das Interferenzmuster und umgekehrt.<sup>31</sup>

---

<sup>27</sup> Vgl. ebd. S. 39.

<sup>28</sup> Ebd. S. 42.

<sup>29</sup> Vgl. ebd. S. 41.

<sup>30</sup> Vgl. ebd. S. 42ff.

<sup>31</sup> Vgl. ebd. S. 47.

In einem engen Zusammenhang mit dem oben genannten Komplementaritätsprinzip von Interferenzmuster und Unterscheidbarkeit der »klassisch denkbaren Möglichkeiten« ist die Unbestimmtheitsrelation für Ort und Impuls:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \quad (1)$$

Die Aussage der Unbestimmtheitsrelation ist, dass es nicht möglich ist, Quantenobjekte in einen Zustand zu bringen, in dem die Unbestimmtheit des Ortes  $\Delta x$  und die Unbestimmtheit des Impulses  $\Delta p$  beliebig klein sind. Die Unbestimmtheit ist dabei im Sinne der Standardabweichung zu verstehen.<sup>32</sup>

Es ist an dieser Stelle anzumerken, dass sich das oben genannte Komplementaritätsprinzip und die damit in Verbindung stehende Unbestimmtheitsrelation verallgemeinern lassen und nicht nur auf die beiden Messgrößen Ort und Impuls Anwendung finden. Generell besteht der allgemeine Zusammenhang, dass komplementäre Eigenschaften eines Quantenteilchens sich nicht gleichzeitig beliebig genau messen lassen.

## Verschränkung

*„Eine Messung an einem der Quantenobjekte bewirkt instantan auch eine Präparation aller mit ihm verschränkten Quantenobjekte.“<sup>33</sup>*

Dieser Wesenszug der Quantenphysik wurde zum Beispiel bei Experimenten mit speziellen Photonen-Paaren nachgewiesen. Man bringt dabei ein Kalzium-Atom in einen angeregten Zustand, aus dem es durch Abstrahlung von zwei Photonen  $a$  und  $b$  in den Grundzustand übergeht. Es ist mit Hilfe eines Blendenpaares möglich, zwei Photonen mit entgegengesetzten Impulsen auszuwählen. Außerdem wird je ein Polarisationsfilter in die »Wege « der Photonen  $a$  und  $b$  gebracht. Wenn die beiden Polarisationsfilter die gleiche Ausrichtung  $\varphi$  gegen die Vertikale haben, so stellt man fest, dass jedes Mal, wenn Photon  $a$  vom Filter absorbiert wird, auch das Photon  $b$  absorbiert wird und wenn das Photon  $a$  durchgelassen wird, dann auch das Photon  $b$ . Die zwei Zufallsprozesse, denen die beiden Photonen unterliegen, sind offensichtlich nicht unabhängig voneinander. Die Ergebnisse von Photon  $a$  korrelieren mit denen von Photon  $b$ . Die Korrelation beobachtet man bei jeder Stellung der beiden Polarisationsfilter, solange sie nur die gleiche Ausrichtung  $\varphi$  aufweisen.<sup>34</sup>

---

<sup>32</sup> Vgl. ebd. S. 47.

<sup>33</sup> Ebd. S. 83.

<sup>34</sup> Vgl. ebd. S. 74f.

Um das Auftreten der Korrelation zu beschreiben, bieten sich grundsätzlich zwei gegensätzliche Theorien an.<sup>35</sup>

- Eine lokale Theorie mit verborgenen Parametern: Die Photonen hatten schon vorher die Eigenschaft, von einem Filter mit Orientierung  $\varphi$  durchgelassen bzw. absorbiert zu werden.
- Eine nichtlokale Theorie: Wenn Photon  $a$  durchgelassen, beziehungsweise absorbiert wird, geht die Information zum Photon  $b$ , das sofort die gleiche Eigenschaft erhält.

Es lässt sich experimentell zeigen, dass die an den Photonenpaaren gemessenen Häufigkeiten die Bellsche Ungleichung nicht erfüllen. Die Konsequenz daraus ist, dass das Verhalten der Photonenpaare nur durch eine nichtlokale Theorie beschrieben werden kann. Die Quantenphysik ist eine solche Theorie, welche die experimentellen Ergebnisse vorzüglich beschreibt.<sup>36</sup>

Der Aspekt der Verschränkung von Quantenobjekten liefert auch einen Einblick in die Dekohärenztheorie und somit auf die Lösung des bekannten Schrödingers Katzenparadoxon. Dabei stellt sich die Frage, warum keine Interferenzerscheinungen bei makroskopischen Objekten beobachtet werden können. Nun ist es so, dass zwei Quantenobjekte stets miteinander verschränkt werden, wenn sie miteinander wechselwirken. Je größer ein Objekt ist, umso eher und umso wahrscheinlicher wechselwirkt es mit anderen Objekten der Umgebung. Es lässt sich zeigen, dass diese Wechselwirkung bei einem klassischen Objekt innerhalb von kürzester Zeit einen Zustand erzeugt, in dem Interferenzerscheinungen nicht mehr beobachtet werden.<sup>37</sup>

## 2.2. Auswirkung auf Wissenschaft und Gesellschaft

Nachdem im vorherigen Abschnitt grundsätzliche Wesenszüge der Quantenphysik behandelt wurden, ergibt sich an dieser Stelle die Frage, welche Auswirkung diese Theorie auf den wissenschaftlichen Fortschritt und auf die Gesellschaft hat. Im Falle einer bedeutungsvollen Beeinflussung lässt sich schlussendlich argumentieren, dass dieses Thema auch eine Relevanz für den Schulunterricht hat. Dieses Unterkapitel bezieht sich dabei zu großen Teilen auf das Buch: »Quantenphysik in der Nanowelt« von Hans Lüth.

In ihren Ursprüngen war die Quantenphysik eine Theorie zur Beschreibung der atomaren Welt. Es hat sich aber herausgestellt, dass sie eine viel universellere Bedeutung für das Verständnis der uns umgebenden Welt hat.

---

<sup>35</sup> Vgl. ebd. S. 75.

<sup>36</sup> Vgl. ebd. S. 75ff.

<sup>37</sup> Vgl. ebd. S. 83ff.

In einer gewissen Weise ist das auch nicht ganz so verwunderlich, da die Materie aus Elementarteilchen aufgebaut ist. Erst die Gesetze der Quantenphysik lassen uns im vollen Umfang verstehen, warum diese Materie überhaupt stabil ist. Die Grundprinzipien der Quantentheorie sind deswegen an irgendeiner Stelle in fast jeder modernen Natur-oder Ingenieurwissenschaft zu berücksichtigen.<sup>38</sup>

Die nachfolgende Abbildung zeigt auf eine qualitative Weise, bis zu welchem Grad ausgewählte Wissenschaftsgebiete mit Aspekten der Quantenphysik überlappen:

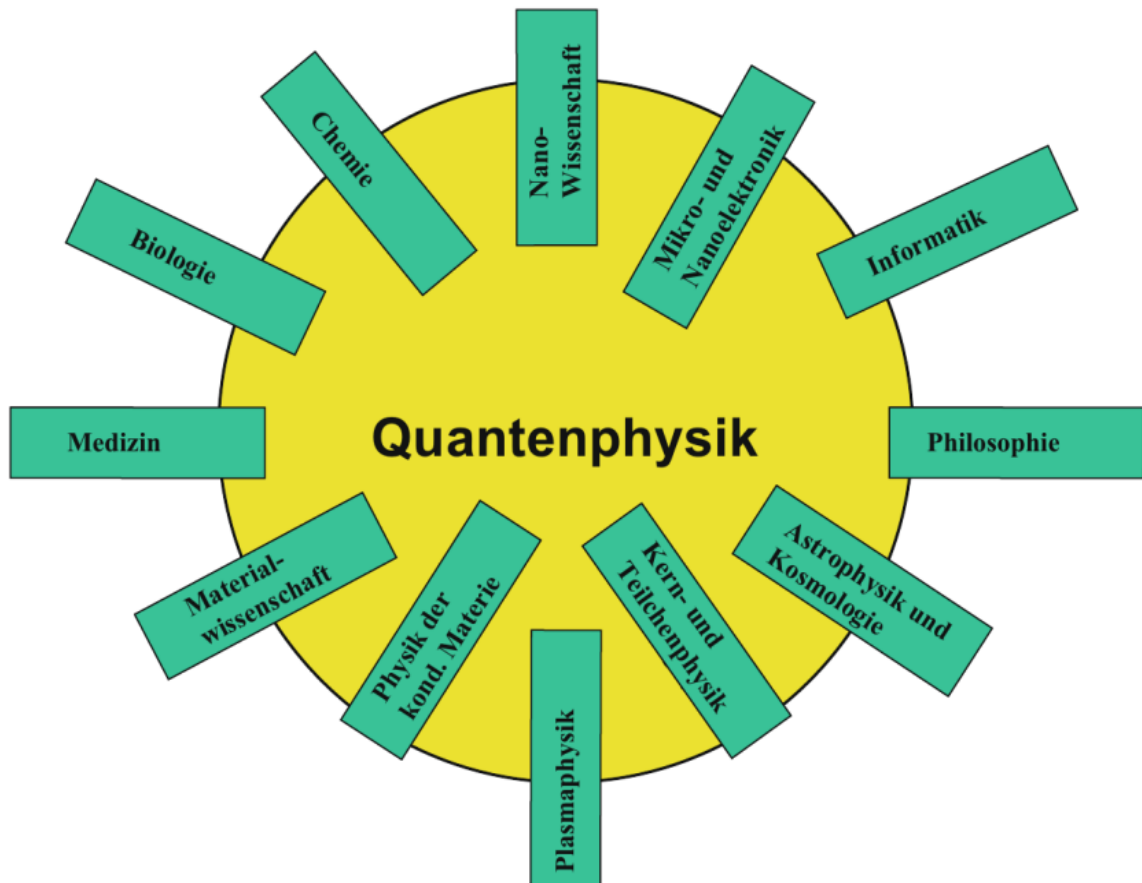


Abbildung 1 Überlappung ausgewählter Wissenschaftsgebiete mit der Quantenphysik<sup>39</sup>

In weiterer Folge werden einige der Wissenschaftsgebiete, die in Abbildung 1 dargestellt sind näher betrachtet. Es wird beschrieben, bis zu welchem Grad man sich in den jeweiligen Disziplinen quantenmechanischer Methoden und Überlegungen bedient.

- Als erstes Beispiel wird die Chemie gewählt: Jeder Prozess, der chemisch im Labor oder in der Industrie geschieht, hat mit chemischen Bindungen zu tun und unterliegt der Quantenphysik. Es ist nicht notwendig jede Problemstellung mit den Gesetzen der Quantenphysik zu überdenken, aber bei schwierigen und detaillierten Fragestellungen muss teilweise auf quantenphysikalische Grundlagen zurückgegriffen werden.

<sup>38</sup> Vgl. Lüth (2009), S. 3.

<sup>39</sup> Vgl. ebd. S. 4.

- Auch in der Biologie gibt es Anwendungsbereiche. Als Beispiel kann hier die Molekularbiologie genannt werden, die sich mit Abläufen auf atomarer und molekularer Ebenen beschäftigt. Die Entschlüsselung der DNA (deoxyribonucleic acid) und ihrer Funktion bei der Vererbung geschah auf dem Boden der Quantenphysik. Die Berechnung von Faltungsmöglichkeiten und damit verbundenen biologischen Aktivitäten geschieht mit quantenphysikalischen Methoden.
- Wenn man die Medizin betrachtet, so stellt man fest, dass einige wichtig bildgebende Diagnoseverfahren, wie zum Beispiel die NMR (nuclear magnetic resonance) oder die PET (positron emission tomography), auf quantenphysikalischen Prozessen aufbauen.
- Wissenschaftliche Disziplinen, die weit in den Quantenkreis hineinreichen, sind die Gebiete der Materialwissenschaft, der Mikro- und Nanoelektronik, sowie der Nanowissenschaft. Die in diesen Gebieten verwendeten theoretischen Modelle und experimentelle Methoden sind nur mit der Quantenphysik zu erfassen. Dabei kann die Beschreibung des elektrischen Widerstands, der die Streuung von Ladungsträgern an Atomstörstellen und Gitterschwingungen beinhaltet, als Beispiel genannt werden, sowie auch das Raster-Elektronen-Tunnelmikroskop, das Strukturuntersuchungen auf atomarer Ebene erlaubt. An dieser Stelle soll auch das Bändermodell genannt werden, also die quantenphysikalische Beschreibung der elektronischen Struktur von Festkörpern. Auf deren Kenntnis basiert auch das Verständnis der wichtigsten Bauteile in Computern, nämlich der Transistoren.
- Einige wissenschaftliche Disziplinen sind überhaupt erst auf der Basis der Quantenphysik entstanden, wie zum Beispiel die Kernphysik und die Teilchenphysik.
- Auch im Bereich der Informatik spielt die Quantenphysik eine immer größere Rolle, seitdem die Quanteninformation ein starkes und sich schnell entwickelndes Gebiet geworden ist. Ihre Realisierung in Quantencomputern sowie die Erstellung dementsprechend angepasster Algorithmen ist eine wichtige Aufgabe.<sup>40</sup>

Nach Lüth geht die Bedeutung der Quantenphysik für die Wissenschaft Hand in Hand mit ihrem Einfluss auf die Alltagswelt, den man gar nicht hoch genug einschätzen kann. Viele Produkte, die wir tagtäglich bedienen, wären ohne die Quantenphysik nicht vorhanden, dazu zählt unter anderem jedes Smartphone. Die Entwicklung des Lasers führte zu wichtigen Anwendungen, unter anderem in der Augenheilkunde. Atomuhren, die beim Betrieb des GPS (global positioning system) zum Einsatz kommen, sind Produkte der Quantenphysik.<sup>41</sup>

---

<sup>40</sup> Vgl. ebd. S. 3ff.

<sup>41</sup> Vgl. ebd. S. 5f.



Unser gesamtes Informationszeitalter basiert auf integrierten Transistoren und wurde nur ermöglicht, indem man die Struktur von Halbleitern zu verstehen lernte. Kurz gesagt: Quantenphysik ist eine wichtige Basis unserer modernen Welt.<sup>42</sup>

Eine abschließende Bemerkung zur Auswirkung der Quantenphysik auf unsere Gesellschaft betrifft den Bereich der Philosophie. Die weitaus stärkste Wechselwirkung ist hierbei auf dem Gebiet der Erkenntnistheorie gegeben. Zwei fundamentale Aspekte der Quantenphysik haben das philosophische Denken beunruhigt: Einerseits das inhärent statistische und somit nicht-deterministische Geschehen auf der Ebene von Quantenobjekten und andererseits die Verwicklung des menschlichen Beobachters im physikalischen Messprozess.<sup>43</sup>

### 2.3. Schülerinnen und Schüler zur Quantenphysik

Nach der Darstellung der Auswirkung der Quantenphysik auf die Wissenschaft und die Gesellschaft stellt sich auch die Frage, welche Bedeutung die Schülerinnen und Schüler der Sekundarstufe II der Quantenphysik zuschreiben. Dieser Fragestellung wurde unter der Verwendung einer qualitativen Forschungsmethode nachgegangen. Dabei wurden Interviews am Wiener Bundesoberstufenrealgymnasium »borg3« durchgeführt. Bei der Auswahl der Teilnehmer der Interviews wurde im Rahmen der Möglichkeiten auf Diversität geachtet: Es wurden zwei Interviews in der 12.Schulstufe durchgeführt, in einer Klasse mit musikalischem Schwerpunkt. Zwei weitere Interviews wurden in der 11.Schulstufe durchgeführt, in einer Klasse mit naturwissenschaftlichem Schwerpunkt. Dabei wurde jeweils ein männlicher und ein weiblicher Interviewpartner gewählt.

Aus dem Ergebnis dieser qualitativen Befragung können natürlich keine allgemein gültigen Aussagen gewonnen werden, aber diese Forschungsdaten geben doch einen ersten Einblick in Erwartungshaltungen von Schülerinnen und Schülern zur Quantenphysik. Diese Daten sollen dabei helfen, die Relevanz der Quantenphysik im Schulunterricht der Sekundarstufe II zu prüfen und werden im weiteren Verlauf dieser wissenschaftlichen Arbeit auch als Diskussionsgrundlage herangezogen. Die vollständigen Interviews mit den Schülerinnen und Schülern des »borg3« sind im Anhang ersichtlich.

Zum Abschluss dieses Unterkapitels werden die gewonnen Erkenntnisse aus den Interviews auch mit der Fachliteratur verglichen. Als Grundlage dazu dient das Werk von Rainer Müller: »Quantenphysik in der Schule«. In diesem wurden Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten zum Thema Quantenphysik herausgearbeitet.

---

<sup>42</sup> Vgl. ebd. S. 5f.

<sup>43</sup> Vgl. ebd. S. 7.

Aus den Interviews konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Bei den vier befragten Personen bestand generell ein Interesse daran Physik, zu lernen, um die Abläufe, mit denen man jeden Tag in der Welt konfrontiert wird, auch zu verstehen. Auch im speziellen Bereich der Quantenphysik besteht bei allen Befragten Interesse. Die Schülerin und der Schüler der 8C, der Klasse mit dem musikalischen Schwerpunkt, geben an, dass man von der Quantenphysik schon einmal etwas gehört haben sollte. Gleichzeitig äußern sie aber, dass es eine Thematik ist, die schwierig zu verstehen sei. In dieser Hinsicht schlägt Stefan vor, dass man die Quantenphysik in der Schule nicht vertiefen und die mathematischen Beschreibungen auf ein Minimum reduzieren sollte. Auch die Schülerin und der Schüler der 7A, der Klasse mit dem naturwissenschaftlichen Schwerpunkt, zeigen Interesse an der Quantenphysik. Anna macht aber den Vorschlag, die Quantenphysik erst in der 8.Klasse zu unterrichten, da die Thematik zu schwierig sei und somit zu Desinteresse führen könnte.
- Bei den Befragungen hat sich gezeigt, dass in diesen beiden Klassen die verwendete Mathematik kein Hindernis darstellte, um den Unterricht der Quantenphysik folgen zu können. Die Annahme des Verfassers ist in dieser Hinsicht, dass bei der Unterrichtung der Quantenphysik im »borg3« nur ein Minimum an mathematischen Formalismus verwendet wird.
- Im Rahmen der Befragung ist beim Verfasser auch der Eindruck entstanden, dass die Vorstellungen, welche die befragten Personen mit der Quantenphysik in Verbindung bringen, sehr unsicher und fehlerhaft sind. Stefan aus der 8C gibt generell an, dass er nicht viel mit der Quantenphysik assoziieren kann, weil die Thematik wirklich schwierig zu verstehen sei. Seine Klassenkollegin spricht davon, dass es faszinierend und gleichzeitig verwirrend ist, wie in der Physik Modelle an ihre Grenzen stoßen und durch neue Theorien ersetzt werden müssen. Die Begriffe, die sie mit der Quantenphysik in Verbindung bringt, sind unter anderem Schrödingers Katzenparadoxon und die »The Big Bang Theory«<sup>44</sup> Sebastian aus der 7A ist auch vom Schrödingers Katzenparadoxon begeistert, weil man es in seiner Form des Gedankenexperiments im Endeffekt auf alles übertragen könne, so zum Beispiel auf Beziehungsfragen. Darüber hinaus gibt Anna aus der 7A an, dass sie den Welle-Teilchen Dualismus in der Quantenmechanik als Herausforderung sieht:

*„...bisher waren Teilchen immer Teilchen und Wellen immer Wellen und auf einmal bekommt man gesagt, einfach so, ok das sind doch nicht Wellen und doch keine Teilchen. Das ist halt ziemlich kompliziert.“*

---

<sup>44</sup> Anm. des Verfassers: Hier ist von der entsprechenden Fernsehserie die Rede.

- Aus Sicht des Verfassers ist eine Erkenntnis der Interviews, dass bei den vier befragten Personen mehr als nur Interesse bei der Quantenphysik vorhanden ist. Es ist vielmehr eine Faszination. Den Schülerinnen und Schülern ist es bewusst, dass die Quantenphysik eine erfolgreiche moderne Theorie ist, die auf die Wissenschaft und die Gesellschaft einen großen Einfluss nimmt. Das liegt sicher auch daran, dass sie in der populären Fernsehshow »The Big Bang Theory« oft angesprochen wird. Aber dadurch, dass die Theorie so unintuitiv und schwierig zu verstehen ist, schreibt man ihr eine Art »mystische Macht« zu. Alle Eindrücke der Welt, die doch real erfassbar sind, die man aber nicht erklären kann, schreibt man auf irgendeiner Weise der Quantenphysik zu. Für Anna aus der 7A zeigt sich aus der Quantenphysik, dass es Sachen auf der Welt gibt, die man einfach nicht ändern kann und die man akzeptieren muss, und sie spricht dabei vom Verlust von Menschen, die einem nahe sind. Ihr Klassenkollege Sebastian formuliert es noch eindeutiger. Auf die Frage, was seiner Meinung nach die zentralen Aspekte der Quantenphysik seien, antwortet er:

*„Mysterium. Weil es eben so ist, dass wir noch nicht alles darüber wissen und auch nicht alles erklären können ... das Monster von Loch Ness. Das ist genau so ein Mysterium ...“*

Die gewonnenen Daten stellen nur eine sehr kleine Teilmenge einer Grundgesamtheit an Schülerinnen und Schülern der Sekundarstufe II dar. Trotzdem wird an dieser Stelle durch den Verfasser gewagt, eine vorsichtige Extrapolation der Daten durchzuführen.

Bei den Schülerinnen und Schülern der Sekundarstufe II besteht ein generelles Interesse, die Welt in der sie sich befinden, auch zu verstehen. Im Bereich der Quantenphysik führt das sogar zu einer regelrechten Faszination und man möchte mehr über diese »mystische« Theorie lernen, die das moderne Leben beeinflusst. Darüber hinaus zeigt sich, dass sich die Quantenphysik für die Schülerinnen und Schüler als schwieriges und unintuitives Themengebiet präsentiert. Mit dieser Gegebenheit steht auch ein breites Spektrum unterschiedlicher Fehlvorstellungen in Verbindung. Bei den geführten Interviews wurden von den Schülerinnen und Schülern zwei konkrete Aspekte der Quantenphysik genannt, die aus Sicht des Verfassers von Fehlvorstellungen geprägt sind: Das ist einerseits das Katzenparadoxon von Schrödinger und andererseits der Welle-Teilchen Dualismus an sich.

Diese Vorstellungen müssen bei der Unterrichtung in der Sekundarstufe II auch berücksichtigt werden, denn moderne Ansätze zur Vermittlung der Quantenphysik sollten sich nicht nur an der Sachstruktur der Inhalte orientieren, sondern auch den Lernenden als zentrales Objekt des Lernprozesses berücksichtigen.<sup>45</sup>

---

<sup>45</sup> Vgl. Müller (2003), S. 2.

## Vergleich mit der Fachliteratur

Die Erkenntnisse in Hinblick auf Vorstellungen von Schülerinnen und Schülern zur Quantenphysik, die im Rahmen der durchgeführten Interviews gewonnen wurden, bilden nur eine kleine Teilmenge der Grundgesamtheit. Daher ist es an dieser Stelle sinnvoll, einen Vergleich mit der Fachliteratur durchzuführen. Als Grundlage dient dabei, wie zuvor erwähnt, das Werk von Rainer Müller: »Quantenphysik in der Schule«. Dieses Werk präsentiert einen großen Umfang an unterschiedlichen Vorstellungen und basiert auf verschiedenen Teilstudien. An dieser Stelle wird ein kurzer Auszug präsentiert, der vor allem auf den Vergleich mit den Erkenntnissen der Interviews abzielt.

Im Rahmen der Fachliteratur wird umfassend auf Schülervorstellungen zum Aspekt der Welleneigenschaften von Quantenobjekten eingegangen. Dieser Aspekt steht im engen Zusammenhang mit dem Welle-Teilchen Dualismus, der auch im Rahmen der Interviews genannt wurde. Im speziellen wird hierbei auf Elektronen eingegangen:

*"Die meisten Schüler bleiben trotz der Experimente bei der Vorstellung vom Elektron als Teilchen. Die Teilchenvorstellung wird dabei nicht nur durch physikalische Eigenschaften (Masse, Geschwindigkeit, Bahnkurve), sondern besonders durch die meist kugelförmige Gestalt charakterisiert. Diese Gestalt wird beibehalten, während gewisse Ad-hoc-Annahmen (meist über die Bahnkurve) die Versuchspänomene erklären sollen. [...] Beugung wird als Ablenkung aufgefasst, während Interferenz hauptsächlich mit Auslöschung und Verstärkung von Wellen assoziiert wird"<sup>46</sup>*

Im Gegensatz dazu wird das Katzenparadoxon von Schrödinger nur ganz kurz angesprochen und nicht im Detail behandelt. Es wurde einzig die Frage gestellt, ob die Studierenden schon einmal etwas von Schrödingers Katze gehört haben und ob sie wiedergeben können, worum es dabei geht.<sup>47</sup> Das ist aus Sicht des Verfassers durchaus bemerkenswert, nachdem dieses Paradoxon den Schülerinnen und Schülern des »borg3« besonders in Erinnerung geblieben ist, und sie damit faszinierende Vorstellungen in Verbindung bringen.

Darüber hinaus wird in der Fachliteratur auch auf die folgende Vorstellungen eingegangen:<sup>48</sup>

- Atomvorstellungen
- Vorstellungen zur Bahn und Bewegung von Quantenobjekten
- Vorstellungen zur Unbestimmtheitsrelation

---

<sup>46</sup> Ebd. S. 3.

<sup>47</sup> Vgl. ebd. S. 32.

<sup>48</sup> Vgl. ebd. S. 2ff.

## 2.4. Lehrpläne der Sekundarstufe II

Als abschließender Schritt, um die Rechtfertigung der Unterrichtung der Quantenphysik in der Sekundarstufe II zu prüfen, wird an dieser Stelle ein Blick auf die bestehenden Lehrpläne geworfen. Um auch an dieser Stelle ein möglichst breites Spektrum abzudecken, werden drei unterschiedliche Lehrpläne betrachtet. Die Vertreter der verschiedenen Schultypen sind einerseits die AHS und andererseits als Vertreter der BMHS die HTL und die BAKIP.

Die nachfolgende Abbildung zeigt einen Überblick über die Struktur des Österreichischen Bildungssystems bis zur Reifeprüfung. Die rot umrahmten Blöcke stellen dabei den Bereich dar, aus dem in weiterer Folge die Lehrpläne betrachtet werden:

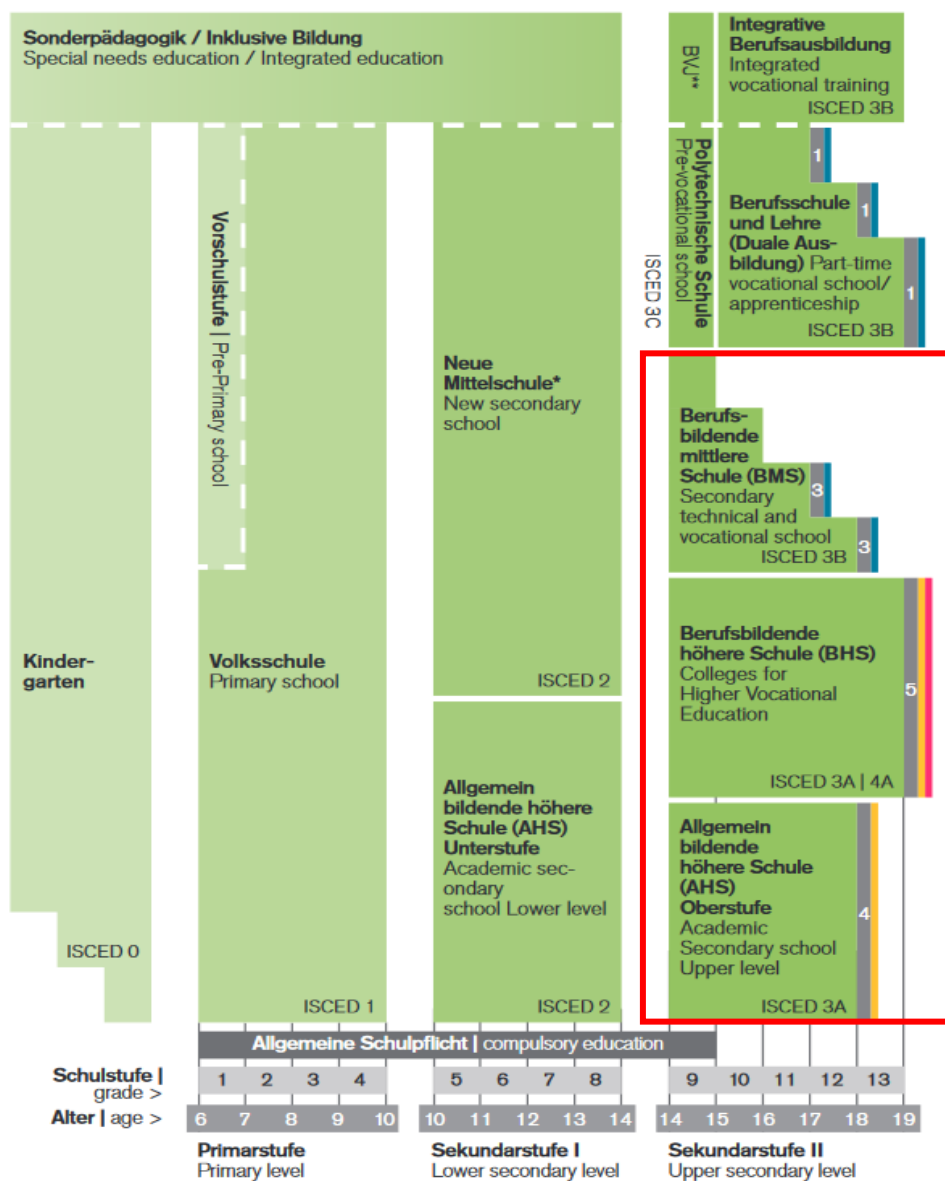


Abbildung 2 Struktur des österreichischen Bildungssystems bis zur Reifeprüfung<sup>49</sup>

<sup>49</sup> Vgl. Homepage des Bundesministeriums für Bildung und Frauen Das österreichische Bildungssystem. [Zugriff am 17.05.2016] Anm. des Verfassers: Die Abbildung wurde durch den Verfasser verändert.

## AHS

Der erste Lehrplan, welcher in diesem Vergleich betrachtet wird, ist der Lehrplan der AHS-Oberstufe. Als Startpunkt wird vom allgemeinen Teil des Lehrplanes ausgegangen, der unter anderem den gesetzlichen Auftrag der AHS enthält. Dieser lautet:

*„Die allgemein bildende höhere Schule hat die Aufgabe, den Schülerinnen und Schülern eine umfassende und vertiefte Allgemeinbildung zu vermitteln und sie zugleich zur Hochschulreife zu führen (§ 34 des Schulorganisationsgesetzes).“<sup>50</sup>*

Als nächster Schritt wird der Teil des Lehrplanes betrachtet, der sich im speziellen auf den Physikunterricht in der Oberstufe bezieht. Hierbei findet sich im Rahmen der Bildungs- und Lehraufgaben des Physikunterrichts die folgende Formulierung:

*„Die Schülerinnen und Schüler sollen ... die Bedeutung physikalischer Phänomene und Konzepte im Alltag und in der Umwelt und für die Welterkenntnis erfassen und für ihre Lebensgestaltung nutzen. Dadurch sollen die Schülerinnen und Schüler Einblicke in die Vorläufigkeit von naturwissenschaftlichen Erkenntnissen erhalten und die Bedeutung neuer Sichtweisen ... sowie die Physik als schöpferische Leistung der Menschheit und damit als Kulturgut erkennen...“<sup>51</sup>*

Des Weiteren sind die Stellen des Lehrplanes von Interesse, in denen ein expliziter Bezug auf die Quantenphysik gemacht wird. Hierbei wird man im Abschnitt des Lehrstoffes der 7. und 8. Klasse an mehreren Stellen fündig:

*„Die Schülerinnen und Schüler sollen ... Einblicke in die Theorieentwicklung und das Weltbild der modernen Physik gewinnen...Licht als Überträger von Energie begreifen und über den Mechanismus der Absorption und Emission die Grundzüge der modernen Atomphysik (Spektren, Energieniveaus, Modell der Atomhülle, Heisenberg'sche Unschärferelation, Beugung und Interferenz von Quanten, statistische Deutung) verstehen... Verständnis für Paradigmenwechsel an Beispielen aus der Quantenphysik ... entwickeln und Bezüge zum aktuellen Stand der Wissenschaft/Forschung herstellen können...Verständnis für die schrittweise Verfeinerung des Teilchenkonzepts, ... bis zur Physik der Quarks und Leptonen, gewinnen und damit die Vorläufigkeit wissenschaftlicher Erkenntnisse verstehen.“<sup>52</sup>*

---

<sup>50</sup>.BGBl. Nr. 88/1985 zuletzt geändert durch BGBl. II Nr. 113/2016. Anlage A. Erster Teil. Allgemeines Bildungsziel.

<sup>51</sup> Ebd.

<sup>52</sup> Ebd.

## HTL

Der nächste Lehrplan, der betrachtet wird, betrifft die HTL. Auch hier steht zu Beginn das allgemeine Bildungsziel im Zentrum. Ein Auszug daraus lautet wie folgt:

*„Höhere technische und gewerbliche Lehranstalten dienen im Rahmen der Aufgabe der österreichischen Schule ... dem Erwerb höherer allgemeiner und fachlicher Bildung ..., die zur Universitätsreife führt und zur Ausübung eines gehobenen Berufes auf technischem oder gewerblichem ... Gebiet befähigt.“<sup>53</sup>*

In diesem Lehrplan wird der Physikunterricht nicht explizit genannt. Stattdessen werden die »Naturwissenschaften« als Pflichtgegenstand angeführt. Dabei gibt es mehrere Kompetenzbereiche. Einer dieser Kompetenzbereiche heißt »Physikalische Phänomene und Methoden« und beinhaltet auch die Quantenphysik. Die Stelle im Lehrplan, die sich auf den III. und IV. Lehrgang bezieht, listet folgende Themenbereiche:

*„Themenbereiche: Bewegungsgleichungen; Schwingungs- und Wellenphänomene in Mechanik, Optik und Elektromagnetismus; Physikalische Felder (Gravitation, elektrische und magnetische Felder); Thermodynamik (zB Wärmetransport, Hauptsätze, Gaskinetik); Moderne Physik (Atom-, Kern- und Teilchenphysik, Quantenphysik, Relativitätstheorie, Astrophysik).“<sup>54</sup>*

## BAKIP

Als letzter Lehrplan wird derjenige der BAKIP betrachtet. Der Ausgangspunkt ist wieder ein Auszug aus dem allgemeinen Bildungsziel:

*„Die Bildungsanstalten für Kindergartenpädagogik haben gemäß § 94 unter Beachtung auf § 2 des Schulorganisationsgesetzes die Aufgabe, den Schülerinnen und Schülern eine fundierte Allgemeinbildung und jene Haltungen und Fähigkeiten zu vermitteln, die für eine professionelle pädagogische Arbeit im Berufsfeld Kindergarten und Hort ... erforderlich sind und sie zugleich zur Universitätsreife zu führen.“<sup>55</sup>*

---

<sup>53</sup> BGBl. II Nr. 300/2011. Anlage 1. I. Allgemeines Bildungsziel.

<sup>54</sup> BGBl. II Nr. 300/2011. Anlage 1. VI. Bildungs- und Lehraufgaben sowie Lehrstoff der gemeinsamen Unterrichtsgegenstände. Naturwissenschaften.

<sup>55</sup> BGBl. II Nr. 327/2004. Anlage. II. Allgemeines Bildungsziel.

Wenn man den Teil des Lehrplanes betrachtet, der sich im speziellen mit Physik beschäftigt, dann fällt ein Unterschied zu den vorhergegangenen zwei Schultypen auf. Ein aussagekräftiger Auszug der Bildungs- und Lehraufgabe lautet wie folgt:

*„Das Staunen über Vorgänge in der Natur soll als Motiv für naturwissenschaftliches Forschen erkannt und erhalten werden. Denken in Modellen und Lösen von Aufgaben (auch in Experimenten) sollen Erfolgserlebnisse ermöglichen und das Selbstvertrauen stärken.“<sup>56</sup>*

Im Lehrstoff wird die Quantenphysik an keiner Stelle explizit genannt. Die einzige Stelle, die aus Sicht des Verfassers implizit darauf verweist ist die folgende allgemeine Formulierung:

*„Die Schülerinnen und Schüler sollen die Einsicht gewinnen in die...Notwendigkeit zur Modifizierung physikalischer Denkweisen, sobald die Forschung neue Erkenntnisse liefert...“<sup>57</sup>*

Nachdem die Auszüge der unterschiedlichen Lehrpläne vorgestellt worden sind, stellt sich die Frage, welche Erkenntnisse daraus gewonnen werden können.

Es stellt sich heraus, dass jede der drei genannten Schultypen einen Schwerpunkt auf die Allgemeinbildung legt. Bei der AHS soll eine »umfassende und vertiefte Allgemeinbildung« vermittelt werden, bei der HTL eine »höhere allgemeine Bildung« und bei der BAKIP eine »fundierte Allgemeinbildung«. Nach Olechowski handelt es sich bei der Allgemeinbildung um die Gewinnung von Grundkompetenzen in möglichst allen Bereichen des Lebens für die kritische Auseinandersetzung mit der gesamten physischen und geistigen Wirklichkeit des Lebens.<sup>58</sup> Betrachtet man noch einmal das Unterkapitel »Auswirkungen auf Wissenschaft und Gesellschaft« und macht man sich bewusst, dass die Physik als Naturwissenschaft die grundlegenden Phänomene der Natur zu erklären versucht, so muss davon ausgegangen werden, dass die Quantenphysik zumindest Implizit in allen genannten Lehrplänen der Sekundarstufe II enthalten sein muss.

Bei den Lehrplänen der AHS und der HTL ist das auch explizit der Fall. Die Ausnahme stellt an dieser Stelle die BAKIP dar. Die Erklärung dafür ist vermutlich die beschränkte Anzahl der Stunden für den Physikunterricht zurückzuführen. Dies ist bei Betrachtung des Schwergewichtes dieses Schultyps auch verständlich.

---

<sup>56</sup> BGBl. II Nr. 327/2004. Anlage. VII. Bildungs- und Lehraufgaben der einzelnen Unterrichtsgegenstände, didaktische Grundsätze, Lehrstoff. Physik.

<sup>57</sup> Ebd.

<sup>58</sup> Vgl. Olechowski (1997), S. 368



## 2.5. Zusammenfassung

Abschließend in diesem Kapitel ist an dieser Stelle festzuhalten, dass die Quantenphysik eine eindeutige Berechtigung hat, in der österreichischen Sekundarstufe II unterrichtet zu werden. Dies wurde bei der Bearbeitung dieses Kapitels aus unterschiedlichen Blickwinkel herausgearbeitet und bestätigt. Es besteht eine große Auswirkung dieser modernen Theorie auf Wissenschaft und Gesellschaft und darüber hinaus besteht bei den Schülerinnen und Schülern der Sekundarstufe II auch ein Interesse, diese zu lernen; in gewisser Weise kann man sogar von einer Faszination sprechen. Dies wird auch durch die derzeit bestehenden Lehrpläne der Sekundarstufe II bestätigt, in denen die Quantenphysik zum Großteil einen festen Platz hat.

### 3. Zentrale Aspekte der Quantenphysik – Phänomenologie

Nachdem die Berechtigungsfrage der Quantenphysik in der österreichischen Sekundarstufe II geklärt worden ist, kann an dieser Stelle der forschungsleitenden Frage nachgegangen werden. Damit stellt dieses Kapitel den eigentlichen Kern dieser Diplomarbeit dar. Wie kann also ein Zugang zu den zentralen Begriffen der Quantenphysik ermöglicht werden, der zum einen konzeptuell korrekt ist und zum anderen mit möglichst wenig mathematischen Formalismus auskommt?

Bei der Frage, was die zentralen Begriffe der Quantenphysik überhaupt sind, wurde im vorherigen Kapitel 2 schon etwas Vorarbeit geleistet, indem allgemeine Wesenszüge der Quantenphysik beschrieben worden sind. Auf diesen wird nun aufgebaut. Einzelne Wesenszüge werden detaillierter dargestellt, andere werden miteinander verknüpft. Teilweise müssen auch zusätzliche Grundbegriffe der Quantenphysik definiert und abgegrenzt werden, die aus Sicht des Verfassers für ein solides Verständnis notwendig sind. Alle zentralen Begriffe, die aus Sicht des Verfassers mit einem phänomenologischen Ansatz konzeptuell korrekt vermittelt werden können, werden in diesem Kapitel nacheinander, jeweils in einem eigenen Unterkapitel, abgearbeitet. All jene Aspekte, bei denen ein korrekter Zugang nur mit einem gewissen mathematischen Rüstzeug ermöglicht werden kann, werden anschließend im Kapitel 4 behandelt.

Nachdem sich dieses Kapitel mit dem phänomenologischen Zugang beschäftigt, stehen im Zentrum jedes Unterkapitels unterschiedliche Experimente, mit denen die zentralen Aspekte qualitativ und anschaulich vermittelt werden können. Es ist allerdings anzumerken, dass ein Teil der angeführten Experimente in den unterschiedlichen Schultypen der österreichischen Sekundarstufe II nicht realisierbar sein werden. Daher wird an entsprechenden Stellen auf geeignete Computersimulationen verwiesen, die man dann im Schulunterricht auch präsentieren kann.

Bei der fachdidaktischen Betrachtung der einzelnen Aspekte der Quantenphysik stützt sich der Verfasser vor allem auf das Werk von Rainer Müller und Hartmut Wieser: »Das Münchner Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik«.

Es ist vom Verfasser auch angedacht, dass der Inhalt dieses Kapitels als Grundlage für ein Unterrichtskonzept der Quantenphysik in der Sekundarstufe II verwendet werden kann. Nachdem solche Unterrichtskonzepte bereits existieren, wird zu Beginn dieses Kapitels der derzeitige Stand der Forschung in diesem Bereich präsentiert. Dabei bezieht sich der Verfasser auf das »Münchner Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik«. Dieses Konzept wurde bereits in Deutschland als Pilotprojekt getestet und evaluiert.

### 3.1. Stand der Forschung

»Das Münchner Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik« von Rainer Müller und Hartmut Wieser wurde bereits in Deutschland als Pilotprojekt getestet und evaluiert. Die Evaluierung dieses Unterrichtskonzepts wurde im Journal »Physics Education – American Journal of Physics« Nummer 70 im Artikel »Teaching quantum mechanics on an introductory level« präsentiert. Dieser Artikel dient in diesem Abschnitt als Grundlage, um den derzeitigen Stand der Forschung zum Thema Quantenphysik in der Sekundarstufe II aufzuzeigen.

»Das Münchner Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik« ist für den Physikunterricht der Sekundarstufe II gedacht. Zu Beginn des Artikels wird die Zielsetzung des Unterrichtskonzeptes kurz zusammengefasst:

*„We present a new research-based course on quantum mechanics in which the conceptual issues of quantum mechanics are taught at an introductory level. In the context of virtual laboratories, the students discover from the very beginning how quantum phenomena deviate from our classical everyday experience...“<sup>59</sup>*

Das Unterrichtskonzept ist in zwei Teile aufgeteilt:<sup>60</sup>

- Der erste Teil ist der »Basiskurs«. Dieser stellt einen rein qualitativen Teil dar. Die Schülerinnen und Schüler sollen die Grundlagen der Quantenphysik erforschen, ohne eine Belastung durch den mathematischen Formalismus zu erfahren. Computergestützte Labors stellen eine Umgebung dar, in der Erfahrungen gesammelt werden können. Die Schülerinnen und Schüler werden früh mit dem seltsamen Verhalten von Quantenteilchen konfrontiert und mit den zentralen Aspekten der Interpretation von diesem.
- Der zweite Teil ist der Kurs für Fortgeschrittene. Hier wird eine Einführung in den Quantenmechanischen Formalismus gegeben. Dieser Formalismus wird eng Verknüpft mit den Phänomenen, die im Basiskurs angesprochen worden sind.

In der nachfolgenden Abbildung ist die Struktur des Basiskurses ersichtlich:

---

<sup>59</sup> Müller R. und Wiesner H. (2002) S. 200.

<sup>60</sup> Vgl. ebd. S. 202.

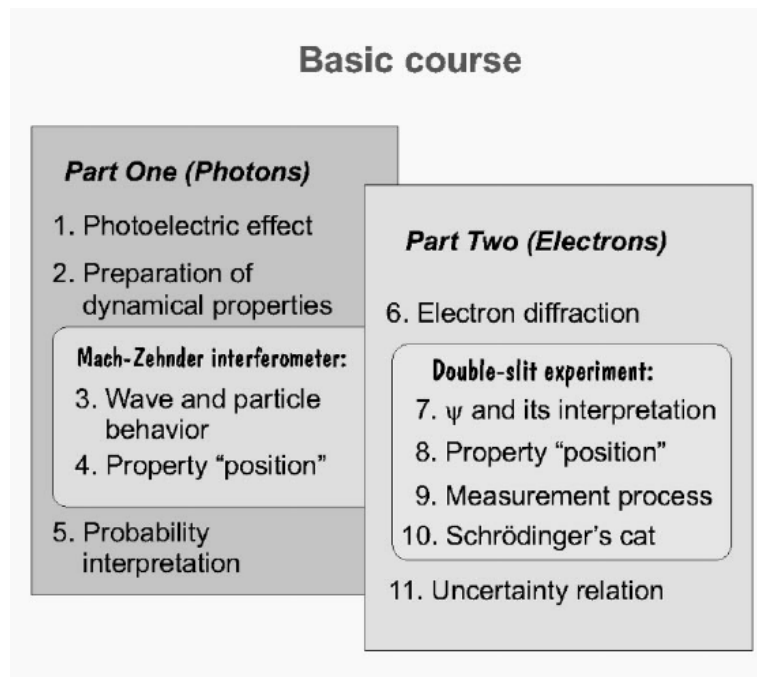


Abbildung 3 Struktur des Basiskurses – Münchner Unterrichtskonzept<sup>61</sup>

Nachdem ein kurzer Überblick über die Struktur des Münchner Unterrichtskonzeptes gegeben wurde, stellt sich die Frage, wie erfolgreich das entsprechende Pilotprojekt in Deutschland ausgefallen ist. Dazu wird an dieser Stelle ein kurzer Auszug der Evaluierung präsentiert:

*„In the actual evaluation, we tested our course in five ... Gymnasium school classes with about 60 students. Two of the classes were nonspecialized physics classes (Grundkurse) with 3 hours a week, and three classes were for students with a special interest in physics (Leistungskurse) with 5 hours per week. The design of the study was as follows: The students were instructed by their regular teachers. Instead of a textbook they were provided with a text ... containing the contents of the course. The simulation programs developed for the course were used in the classroom and, in part, also at home. We used several instruments to measure the success of the course...Questionnaire on students' conceptions...Student interviews...Questionnaire on physics interest...To express the success of the course by a single number, we calculated a statistical index C from 29 items of the questionnaire on students conceptions. An index value of C=+100 corresponds to fully quantum mechanical conceptions, C=-100 means conceptions that contradict strongly to the quantum mechanical ones, and C=0 corresponds to an indifferent attitude...<sup>62</sup>*

<sup>61</sup> Vgl. ebd. S. 202.

<sup>62</sup> Ebd. S. 206.

In der nachfolgenden Abbildung ist auf der linken Seite die Verteilung des »Indexwert C« für alle Teilnehmer der Studie ersichtlich. Alle Schülerinnen und Schüler haben einen positiven Wert C. Das bedeutet, dass die quantenmechanischen Konzepte dominieren. Um die Ergebnisse zu vergleichen wurde der Test auch mit einer Kontrollgruppe durchgeführt. Diese bestand aus 35 Universitätsstudenteninnen und Universitätsstudenten im ersten Studienjahr. Die Verteilung des »Indexwert C« für diese Testgruppe ist in der rechten Abbildung ersichtlich:<sup>63</sup>

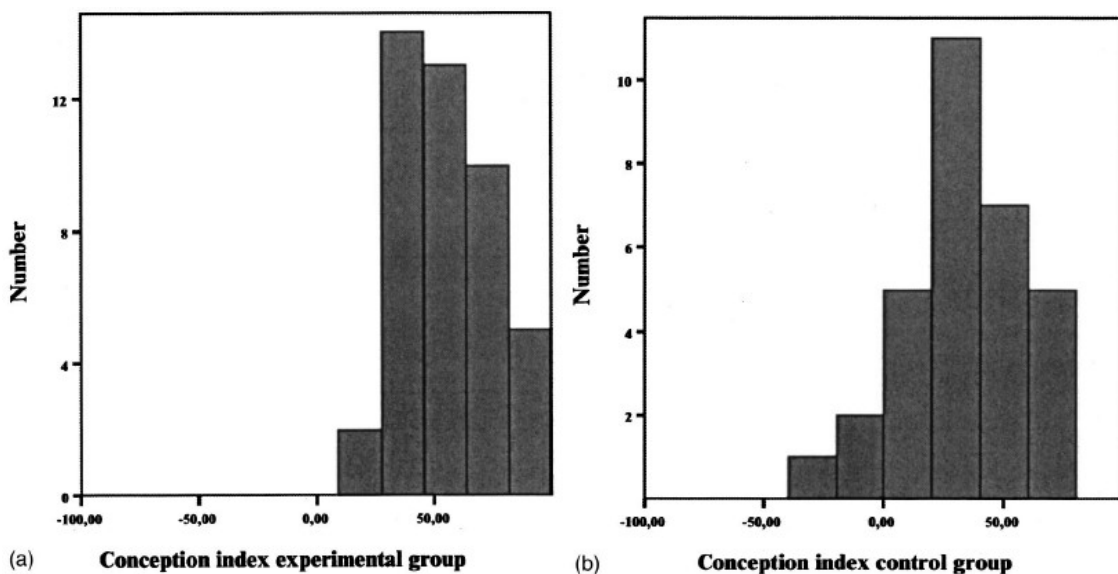


Abbildung 4 Evaluierung des Münchner Unterrichtskonzepts<sup>64</sup>

Abschließend wurde das Ergebnis der Evaluation wie folgt zusammengefasst:

*„To summarize the results of the evaluation, we can say that the correct quantum mechanical conceptions were successfully imparted to most of the students of the experimental group. This understanding was achieved in spite of the large conceptual difficulties inherent in the subject. In addition, many of the common misconceptions encountered in traditional instruction, e.g., in the uncertainty relation, the determinism/indeterminism problem, or the atom conception, have been avoided.”<sup>65</sup>*

Nach diesen Einblick in den derzeitigen Stand der Forschung wird in diesem Kapitel mit der Bearbeitung der zentralen Begriffe der Quantenphysik fortgesetzt, die aus Sicht des Verfassers mit einem phänomenologischen Ansatz konzeptuell korrekt vermittelt werden können.

<sup>63</sup> Vgl. ebd. S. 206f.

<sup>64</sup> Vgl. ebd. S. 207.

<sup>65</sup> Ebd. S.209.

### 3.2. Übergang der klassischen Physik zur Quantenphysik

Dieser erste zentrale Begriff stellt gleichzeitig einen guten Ausgangspunkt für die Unterrichtung der Quantenphysik dar. Schlussendlich ist es von Interesse, wie diese Theorie überhaupt zu ihrem Namen gekommen ist. Beim Zugang zu diesem Begriff bietet sich eine historische Betrachtung an. Wie bereits im Kapitel 2 erwähnt, lieferten unterschiedliche experimentelle Befunde des späten 19. und frühen 20. Jahrhunderts Ergebnisse, die darauf hinwiesen, dass Messgrößen im atomaren Bereich nur ganz bestimmte, »quantisierte« Werte annehmen können. Dies weist auch noch einmal auf den scheinbaren Widerspruch zu den Alltagserfahrungen hin, bei welchen man es im Wesentlichen nur mit kontinuierlichen Messergebnissen zu tun hat.

An dieser Stelle sollen noch einmal die drei wesentlichen experimentellen Befunde angeführt werden, auf die auch Paul Wagner in seinem Buch verweist:

- Um zu einer realistischen Beschreibung der spektralen Intensitätsverteilung der Wärmestrahlung zu gelangen, postulierte Planck im Jahr 1900 eine Quantisierung der Energie elektromagnetischer Oszillatoren.
- Die von Hertz und Hallwachs 1887 durchgeführten Experimente zum photoelektrischen Effekt lieferten eine Grundlage für die 1905 von Einstein postulierte Teilchennatur elektromagnetischer Wellen.
- Die seit 1885 bekannten diskreten optischen Spektralserien veranlassten Bohr zur Annahme diskreter Energiezustände der Atome, was 1913 durch Experimente von Franck und Hertz auch direkt bestätigt wurde.<sup>66</sup>

Aus Sicht des Verfassers sind die experimentellen Befunde des Photoeffekts und der diskreten optischen Spektrallinien ideal dafür geeignet, um einen phänomenologischen Zugang zum Begriff der Quantisierung zu ermöglichen. Die diskreten optischen Spektrallinien können in weiterer Folge auch als Basis für die Einführung des semiklassischen Atommodells von Bohr dienen.

Der Zugang zur Quantenphysik mit Hilfe der spektralen Intensitätsverteilung der Wärmestrahlung ist zwar an sich ein spannendes Thema, da ein rein klassischer Erklärungsversuch auf die berühmte Ultraviolett Katastrophe führt. Allerdings benötigt eine zufriedenstellende Darstellung der Problematik die Einführung von abstrakten Modellen, wie zum Beispiel die Annäherung eines schwarzen Körpers durch einen idealisierten Hohlraum, oder die Beschreibung von erlaubten Schwingungszuständen durch harmonische Oszillatoren. Darüber hinaus erweist sich die Mathematik, die zur Klarstellung und Lösung des Problems benötigt wird, aus Sicht des Verfassers als schwierig.

---

<sup>66</sup> Vgl. Wagner (2012), S. 15.

## Photoeffekt

Viele optische Experimente sprechen dafür, dass es sich beim Licht um eine elektromagnetische Welle handelt. Experimente wie die Beugung am Gitter und am Doppelspalt lassen sich als Interferenzerscheinungen erklären, und das ist ein typisches Merkmal einer Welle.<sup>67</sup>

Nun wird Licht als elektromagnetische Welle durch die Maxwell'schen Gleichungen beschrieben und diese Gleichungen beschreiben eine Kontinuität der Natur. Die Welle des elektrischen und des magnetischen Feldes hat eine beliebig teilbare Amplitude und damit beliebig unterteilbare Energien.<sup>68</sup>

Dennoch gibt es Phänomene, die sich der Erklärung durch die Wellentheorie widersetzen. Hertz und Hallwachs haben 1887 festgestellt, dass eine nicht oxidierte, negativ geladene Metallplatte durch die Bestrahlung mit Licht entladen werden kann. Dieser Effekt wird auch als »äußerer« Photoeffekt<sup>69</sup> bezeichnet. Die Versuchsanordnung ist in der nachfolgenden Abbildung skizziert:<sup>70</sup>

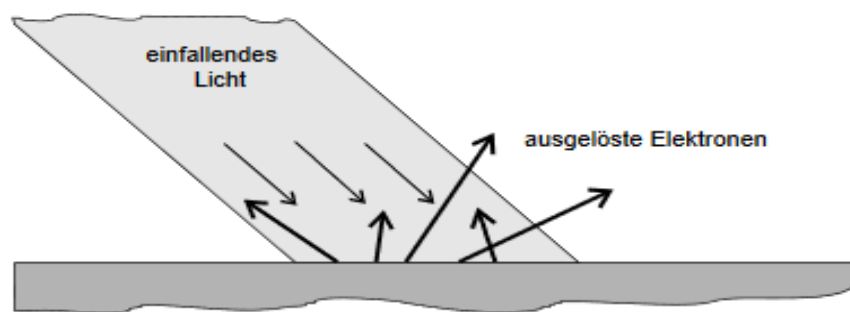


Abbildung 5 Photoeffekt – Prinzipskizze<sup>71</sup>

Wenn man den soeben beschriebenen Effekt experimentell mit einer Quecksilberdampfampe und einer frisch geschmirgelten Zinkplatte nachstellt, so zeigt sich, dass sich die Platte rasch entlädt. Das Licht scheint Elektronen aus der Zinkplatte »herauszuschlagen«. Bringt man eine Glasplatte zwischen die Lichtquelle und die Zinkplatte, so wird keine Entladung festgestellt, selbst wenn man die Intensität sehr stark erhöht. Das Licht der Quecksilberdampfampe hat einen hohen Anteil an ultraviolettem (UV) Licht. Die Glasplatte ist gut dafür geeignet, um UV-Licht zu absorbieren, während sichtbares Licht fast ungehindert passieren kann. Eine mögliche Interpretation dieses Experimentes ist, dass nur UV-Licht den äußeren Photoeffekt auslösen kann.<sup>72</sup>

<sup>67</sup> Vgl. Müller R. und Wieser H. a), S. 7. [Zugriff am 27.05.2016]

<sup>68</sup> Vgl. Rupp (2013), S. 77f.

<sup>69</sup> Anm. des Verfassers: Der »innere« Photoeffekt tritt bei Halbleitern auf.

<sup>70</sup> Vgl. Wagner (2012), S. 486.

<sup>71</sup> Vgl. Müller R. und Wieser H. a), S. 8. [Zugriff am 26.05.2016]

<sup>72</sup> Vgl. ebd. S. 8. [Zugriff am 26.05.2016]

Der äußere Photoeffekt lässt sich nicht mit der Wellentheorie des Lichts erklären. Nach der Wellentheorie werden die Elektronen von der einfallenden Lichtwelle zu Schwingungen ange-regt. Bei größerer Lichtintensität ist auch die elektrische Feldstärke größer. Dann sollten die Elektronen mit größerer Amplitude schwingen, so dass sie leichter aus dem Metall austreten würden. Das steht aber im Widerspruch zu den Beobachtungen.<sup>73</sup>

Daraus folgt eine neuartige Modellvorstellung von der Natur des Lichts: Licht kann als eine Vielzahl von Energieportionen betrachtet werden, die man Photonen nennt. Photonen können Elektronen durch »Stoßprozesse« aus dem Metall herausschlagen. Die Fähigkeit, Elektronen auszulösen, also Energie  $E$  zu übertragen, ist umso größer, je größer die Frequenz  $f$  des eingestrahnten Lichtes ist. Die Proportionalitätskonstante  $h$  wird als Planck'sches Wirkungsquantum bezeichnet:<sup>74</sup>

$$E = h \cdot f \quad (2)$$

Der Effekt soll an dieser Stelle mit einem experimentellen Aufbau, der auch in der Schule denkbar ist, (siehe Abbildung 6) genauer betrachtet werden: In einer evakuierten Röhre befinden sich zwei Elektroden. Auf die Kathode ist eine Metallschicht aus Kalium aufgedampft. Diese Schicht wird auch als Photoschicht bezeichnet. Wird sie von außen mit Licht bestrahlt, so zeigt das über den Messverstärker angeschlossene Amperemeter einen Strom  $I_{ph}$ .an.<sup>75</sup>

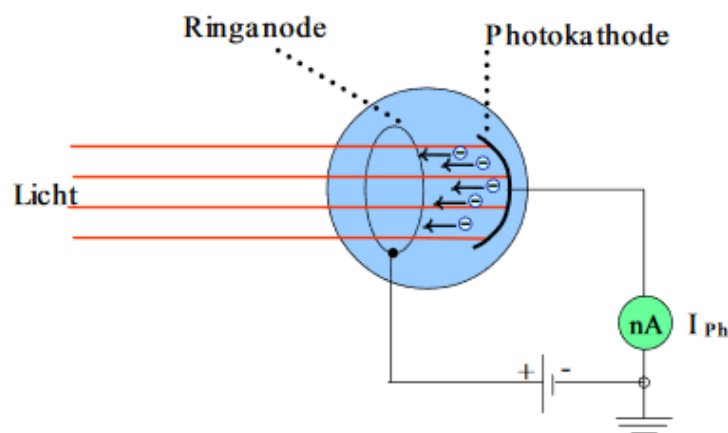


Abbildung 6 Photoeffekt – Experimenteller Aufbau<sup>76</sup>

Im Unterschied zum vorher beschriebenen Experiment wurde hier ein Metall verwendet, bei dem der Photoeffekt schon bei sichtbaren Licht auftritt.

<sup>73</sup> Vgl. ebd. S. 8. [Zugriff am 26.05.2016]

<sup>74</sup> Vgl. ebd. S. 8. [Zugriff am 26.05.2016]

<sup>75</sup> Vgl. ebd. S. 10. [Zugriff am 26.05.2016]

<sup>76</sup> Vgl. ebd. S. 10. [Zugriff am 26.05.2016]



Die aus der Photoschicht herausgelösten Elektronen werden zur Anode hingezogen. Dadurch entsteht in der Photoschicht ein Ladungsdefizit. Über das Amperemeter fließt ein Ausgleichstrom, der als Photostrom  $I_{Ph}$  registriert wird. Die Bestimmung der kinetischen Energie der Elektronen erfolgt durch die »Gegenfeldmethode«. Die Elektronen mit Elementarladung  $e$  werden auf dem Weg zur Anode durch eine Gegenspannung  $U_G$  abgebremst. Der Photonenstrom wird Null, wenn  $U_G$  gerade soweit erhöht wird, dass auch die schnellsten Elektronen die Potentialdifferenz nicht mehr überwinden können. Für die Energie der schnellsten Elektronen  $E_{kin,max}$  ergibt sich dann:<sup>77</sup>

$$E_{kin,max} = e \cdot U_G \quad (3)$$

Es können folgende Zusammenhänge gefunden und plausibel gemacht werden:<sup>78</sup>

- Zunächst betrachten wir die Energiebilanz des äußeren Photoeffekts im Rahmen der Gegenfeldmethode anhand eines elastischen Stoßprozesses zwischen einem Photon und einem Elektron: Das Photon überträgt seine Energie  $h \cdot f$  während des Stoßprozesses auf das Elektron. Nach dem Verlassen des Metalls hat das Elektron die Austrittsarbeit  $W_A$  geleistet und besitzt die maximal mögliche Energie  $E_{kin,max}$ , falls es keine Energie durch interne Stoßprozesse verloren hat. Die Energiebilanz kann in der sogenannten Einsteingleichung dargestellt werden, welche die Gestalt einer Geradengleichung aufweist:

$$E_{kin,max} = h \cdot f - W_A \quad (4)$$

- Mit Hilfe der Einsteingleichung und der experimentell ermittelten Daten lässt sich ein Wert für das Planck'sche Wirkungsquantum  $h$  berechnen. Die Steigung der Geraden bestimmt die Proportionalitätskonstanten zwischen Photonenenergie und Frequenz. Das Planck'sche Wirkungsquantum ist eine kennzeichnende Größe für das Auftreten von Quanteneffekten.
- Die Photonen besitzen einen Impuls  $p$ . Der Impuls, den Strahlung auf Materie überträgt, ist mit der Strahlungsenergie  $E$  über die Gleichung  $p = \frac{E}{c}$  verknüpft. Hierbei steht  $c$  für die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum. Dieser Zusammenhang lässt sich zwar nicht unmittelbar aus dem vorgestellten Experiment ableiten, aber er kann plausibel gemacht werden. Unter Verwendung der zuvor gefundenen Beziehung zwischen Frequenz und Energie von Photonen (Formel (2)) ergibt sich somit:

$$p = \frac{h \cdot f}{c} \quad (5)$$

<sup>77</sup> Vgl. ebd. S. 10. [Zugriff am 26.05.2016]

<sup>78</sup> Vgl. ebd. S. 11ff. [Zugriff am 26.05.2016]

Mit Hilfe des Photoeffekts zeigt sich zum ersten Mal, dass eine eindeutige Antwort auf die Frage »Welle oder Teilchen« in der Quantenphysik nicht möglich ist. Die quantenhafte Übertragung von Energie und die Existenz des Photonenimpulses deuten auf ein Teilchenmodell des Lichts hin. Allerdings lassen sich die experimentellen Befunde zur Interferenz des Lichts nicht ohne weiteres mit einer Teilchenvorstellung erklären. Wellen- und Teilchenvorstellung sind so verschieden, dass man sich nicht vorstellen kann, dass beide gleichzeitig zutreffen. Eine eindeutige Antwort auf die Frage »Welle oder Teilchen« ist in der Quantenphysik nicht möglich. Quantenobjekte sind komplizierter und lassen sich in der Regel nicht auf eine der beiden Alternativen festlegen.<sup>79</sup>

Mit Hilfe der Quantenphysik lässt sich das Verhalten von Photonen und anderen Quantenobjekten vorhersagen und beschreiben. Allerdings ist sie keine anschauliche Theorie. Die korrekte Beschreibung wird mit einer gewissen mathematischen Abstraktheit erhalten.<sup>80</sup>

## Diskrete optische Spektrallinien

Ein weiterer Zugang zur diskreten Natur der Quantenphysik bietet sich in Rahmen der Emissionsspektren von Lichtquellen an. In der Physik unterscheidet man zwischen kontinuierlichen und diskreten Emissionsspektren. Kontinuierliche Spektren entstehen durch Strahlung von glühenden festen oder flüssigen Stoffen, sowie angeregter Gase oder Dämpfe hoher Dichte. Diskrete Spektren entstehen durch Strahlung angeregter Gase kleiner Dichte. Dazu zählen unter anderem die Linienspektren. Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht den Unterschied zwischen kontinuierlichen und diskreten Emissionsspektren auf qualitative Weise:<sup>81</sup>

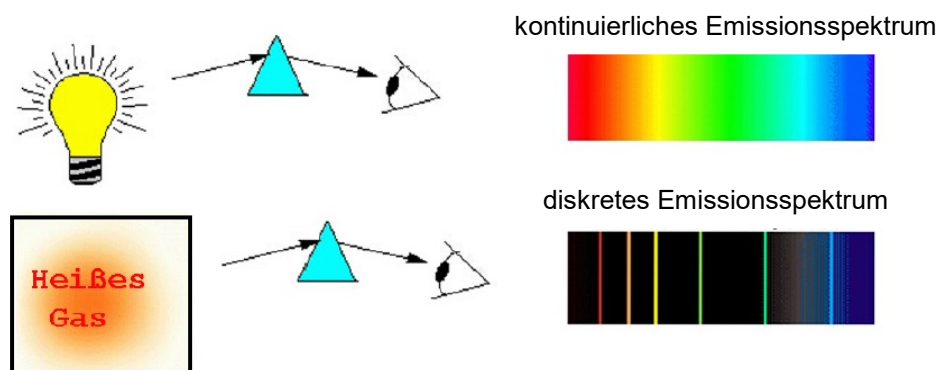


Abbildung 7 Emissionsspektren<sup>82</sup>

<sup>79</sup> Vgl. ebd. S. 13. [Zugriff am 26.05.2016]

<sup>80</sup> Vgl. ebd. S. 14. [Zugriff am 21.06.2016]

<sup>81</sup> Vgl. Homepage Universität Wien. Experimentelle Grundausbildung und Hochschuldidaktik - Physikalische Praktika für Anfänger. PW7 Brechung. Anleitungstext. S. 6f. [Zugriff am 26.05.2016]

<sup>82</sup> Vgl. ebd. S. 7. [Zugriff am 26.05.2016]

Diskrete optische Spektrallinien können auch experimentell im Schulunterricht präsentiert werden. Dazu benötigt man eine Versuchsanordnung mit einer Metalldampfampe und einem Prismenspektrometer. Eine mögliche Anordnung ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt:



Abbildung 8 Linienspektren – Experimenteller Aufbau<sup>83</sup>

In einem weiteren Schritt kann nun das Linienspektrum von Wasserstoff anhand einer entsprechenden Spektraltafel gezeigt werden. In der nachfolgenden Abbildung ist ein entsprechendes Beispiel gegeben. Die Skala ist in nm gegeben:



Abbildung 9 Linienspektrum Wasserstoff<sup>84</sup>

Die Linienspektren wurden bereits Mitte des 19. Jahrhunderts entdeckt. Man konnte sie an einer großen Anzahl unterschiedlicher Substanzen feststellen und katalogisieren. Nicht alle Spektrallinien sind im sichtbaren Bereich und bestimmte Spektrallinien konnte man in Gruppen zusammenfassen. Erklären konnte man sie aber damals nicht. Immerhin gelang es Johann Jakob Balmer 1885, eine mathematische Gesetzmäßigkeit in der empirisch gefundenen Lage der Linien von atomarem Wasserstoff zu finden. (Balmer-Formel).<sup>85</sup>

$$f = f_{Ry} \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (6)$$

Dabei ist  $f_{Ry} = 3,2898 \cdot 10^{15}$  die Rydberg-Frequenz. Die Zahlen  $m$  und  $n \geq m + 1$  sind natürliche Zahlen.

<sup>83</sup> Vgl. ebd. S. 11. [Zugriff am 26.05.2016]

<sup>84</sup> Vgl. Homepage Swiss Federal Institute of Technology in Zurich. Physik IV – Einführung in die Quantenmechanik. [Zugriff am 27.05.2016]

<sup>85</sup> Vgl. Müller R. und Wieser H. a), S. 105. [Zugriff am 26.05.2016]

Das Bemühen, die Linienspektren der Atome zu verstehen, stellte einen entscheidenden Antrieb bei der Entwicklung der Quantenphysik dar und führte unter anderem zur Entwicklung des Bohrschen Atommodells. Bohr wollte mit seinem Modell die Linienspektren der von den Atomen emittierten Strahlung erklären. Dabei ging er unter anderem von folgendem Postulat aus: Ein Atom strahlt nur dann ein Photon ab, wenn ein Elektron von einem stationären Zustand mit der Energie  $E_n$  in einen anderen stationären Zustand mit einer niedrigeren Energie  $E_m$  übergeht. Für die Frequenz des abgestrahlten Photons gilt:  $h \cdot f = E_n - E_m$ . Einen solchen Übergang nannte er Quantensprung, um auszudrücken, dass es sich um einen diskontinuierlichen Prozess handelte.<sup>86</sup>

Im Atommodell nach Bohr wird der zentrale Aspekt der Quantisierung zum Ausdruck gebracht. Allerdings stellt das Modell nur einen Übergang zu den späteren Atommodellen der Quantenphysik dar. Die Bohrschen Modellannahmen waren nämlich vom Standpunkt der klassischen Physik aus unakzeptabel: So bewegen sich die Elektronen im Modell nach Bohr auf Kreisbahnen um den Kern. Eine Rotation stellt eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung dar. Nach den Maxwell'schen Gleichungen strahlen allerdings bewegte Ladungen Energie ab. Die Elektronen im Bohrschen Atommodell präsentieren sich als bewegte Ladungen und müssten demnach kontinuierlich Energie abstrahlen und nach absehbarer Zeit in den Kern stürzen. Das ist allerdings nicht der Fall. Nur aufgrund seiner Erklärungsleistung im Fall des Wasserstoffspektrums wurde das Modell bei zeitgenössischen Physikern akzeptiert.<sup>87</sup>

## Phänomenologie und Mathematik

Aus Sicht des Verfassers bieten die beiden abgehandelten Experimente in diesem Unterkapitel eine gute Möglichkeit, den zentralen Begriff der Quantisierung im Schulunterricht zugänglich zu machen. Sie bieten generell einen guten Einstieg in die Quantenphysik an sich. Die Quantisierung lässt sich dabei gut auf Grund der Phänomene der gezeigten Experimente plausibel machen und es wird nur ein Minimum an mathematischen Formalismus benötigt.

### 3.3. Begriffsbestimmung: Präparation, Zustand, Messung

Um in der weiteren Abhandlung der zentralen Begriffe die Übersichtlichkeit zu wahren, ist es ratsam, gewisse Fachbegriffe der Quantenphysik zu definieren und abzugrenzen. Es handelt sich dabei um die Begriffe Präparation, Zustand und Messung. Diese Bezeichnungen werden nicht exklusiv in der Quantenphysik verwendet, sondern sie finden in jedem Bereich der Physik ihre Anwendung. Jedoch ist es in der Quantenphysik von entscheidender Bedeutung, zwischen ihnen eine klare Unterscheidung zu machen.

---

<sup>86</sup> Vgl. ebd. S. 106f. [Zugriff am 26.05.2016]

<sup>87</sup> Vgl. ebd. S. 107. [Zugriff am 26.05.2016]

Diese Begriffsbestimmung ist aus Sicht des Verfassers auch im Schulunterricht relevant, damit es beim weiteren Zugang der zentralen Aspekte für die Schülerinnen und Schüler nicht zu Verwirrungen kommt. Es bietet sich auch an, die Unterschiede zwischen der klassischen Physik und der Quantenphysik aufzuzeigen, wenn es um diese drei Fachbegriffe geht. Der Messbegriff hat in der Quantenphysik eine tiefere Bedeutung als in der klassischen Physik. Bei den Begriffsbestimmungen wird an geeigneten Stellen wieder auf Experimente verwiesen, die in ähnlicher Form auch im Schulunterricht präsentiert werden können.

## Präparation

Physikalische Objekte, die in einem Experiment untersucht werden sollen, müssen vorher in einen genau bestimmten Zustand gebracht werden. Es müssen kontrollierte Anfangsbedingungen hergestellt werden. Ein Verfahren, mit dem Objekte in einen bestimmten Zustand gebracht werden, nennt man Präparation. Durch Präparation stellt man physikalische Systeme mit bestimmten Eigenschaften her.<sup>88</sup>

Man sollte »dynamische Eigenschaften« von »statischen Eigenschaften« unterscheiden. Die durch Präparation hergestellten Eigenschaften sind veränderlich. Deshalb werden sie als »dynamische Eigenschaft« bezeichnet. Im Gegensatz dazu sind Ladung und Ruhemasse eines Elektrons »statische Eigenschaften«.<sup>89</sup>

Zuerst wird die Präparation aus klassischer Sicht betrachtet: Möchte man in der Mechanik beispielsweise das Gesetz für die Bahnkurve des horizontalen Wurfes überprüfen, so muss eine Abschussvorrichtung hergestellt werden, die es erlaubt, Kugeln gleicher Masse mit möglichst identischen Anfangswerten von Ort  $(x_0, y_0)$  und Geschwindigkeit  $(v_{x0}, v_{y0})$  abzuschießen. Eine Prinzipskizze zu diesem Vorgang ist in der nachstehenden Abbildung ersichtlich.<sup>90</sup>

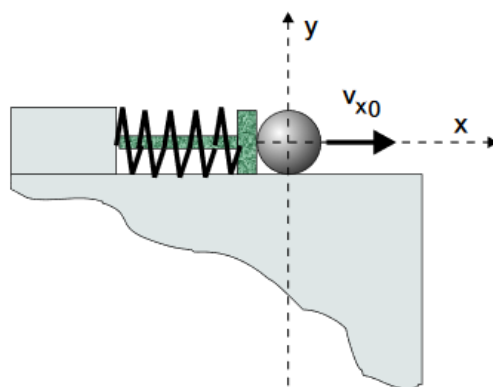


Abbildung 10 Präparation - Klassisch<sup>91</sup>

<sup>88</sup> Vgl. ebd. S. 15. [Zugriff am 27.05.2016]

<sup>89</sup> Vgl. ebd. S. 16. [Zugriff am 27.05.2016]

<sup>90</sup> Vgl. ebd. S. 15. [Zugriff am 27.05.2016]

<sup>91</sup> Vgl. ebd. S. 15. [Zugriff am 27.05.2016]

Auch in der Quantenphysik können Eigenschaften präpariert werden. Als Anschauungsexperiment kann folgender Prismenversuch mit Licht durchgeführt werden, der in der nachfolgenden Abbildung skizziert wird:

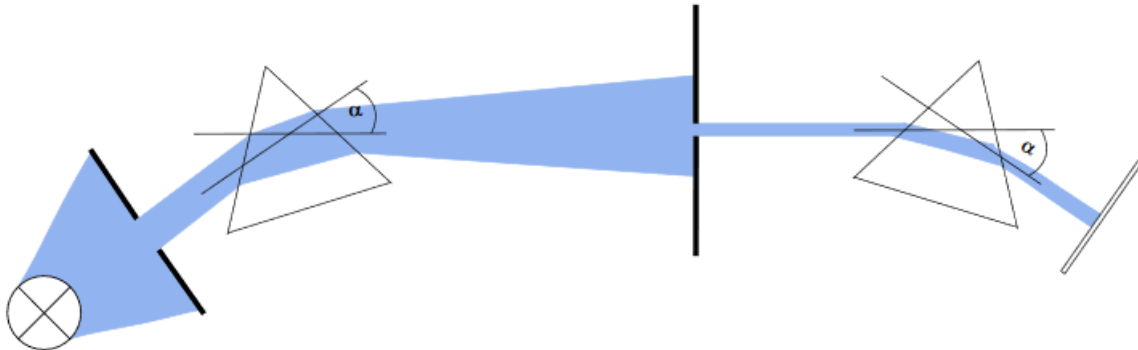


Abbildung 11 Präparation von Eigenschaften<sup>92</sup>

Der Prismenversuch kann wie folgt beschrieben werden: In einem abgedunkelten Raum wird ein dünnes Lichtbündel weißen Lichts auf ein Prisma geleitet. Das Prisma spaltet das Lichtbündel in das farbige Regenbogenspektrum auf. Den einzelnen Farben entsprechen dabei bestimmte Wellenlängen des Lichts. Hinter dem Prisma steht eine Spaltblende, die nur Licht durchlässt, das um einen ganz bestimmten Winkel  $\alpha$  abgelenkt wurde. Das entspricht gleichzeitig einer ganz bestimmten Wellenlänge. Dieses Licht wird dann wiederum auf ein gleichwertiges Prisma gleitet. Der Ablenkungswinkel an diesem Prisma beträgt erneut  $\alpha$ , wobei es zu keiner weiteren Aufspaltung des Lichts kommt.

Das Experiment kann aus Sicht des Begriffs der Präparation analysiert werden: Die Blende hinter dem ersten Prisma lässt nur Licht durch, das um einen bestimmten Winkel abgelenkt wurde. Prisma und Blende haben Licht mit dieser Eigenschaft »präpariert«. Das zweite Prisma hat eine andere Funktion. Es dient als Test. Liefert der Test ein eindeutiges und zugleich vorhersagbares Ergebnis, so besitzt ein Objekt die entsprechende Eigenschaft.<sup>93</sup>

In der klassischen Physik stellt die Präparation von Eigenschaften keine Besonderheit dar. Aber in der Quantenphysik gibt es Phänomene, die es nötig machen, den Begriff der dynamischen Eigenschaft neu zu überdenken. Das kann am Beispiel eines Strahlteilers gezeigt werden. Ein möglicher Versuchsaufbau ist in der nachstehenden Abbildung skizziert:

<sup>92</sup> Vgl. ebd. S. 17. [Zugriff am 27.05.2016]

<sup>93</sup> Vgl. ebd. S. 17. [Zugriff am 27.05.2016]

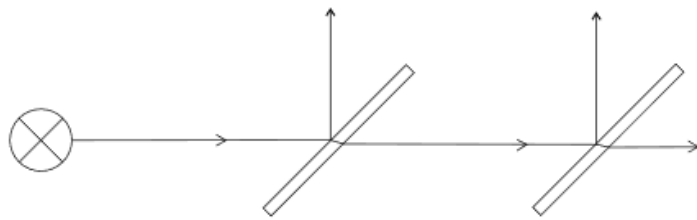


Abbildung 12 Strahlteiler<sup>94</sup>

Bei diesem Experiment fällt Licht in einem Winkel von  $45^\circ$  auf einen Strahlteiler. Das Licht wird teilweise durchgelassen und teilweise reflektiert. Sowohl der transmittierte Strahl als auch der reflektierte Strahl besitzen die gleiche Intensität. Der transmittierte Strahl wird erneut auf einen Strahlteiler im Winkel von  $45^\circ$  geleitet. Dabei wird er erneut in zwei Teilstrahlen mit gleicher Intensität aufgespalten. Es zeigt sich, dass es nicht immer möglich ist, durch einen Versuchsaufbau eine dynamische Eigenschaft zu präparieren. Die mögliche Annahme, dass der Strahlteiler das Licht mit der Eigenschaft »wird transmittiert« beziehungsweise »wird reflektiert« präpariert, ist falsch. Am zweiten Strahlteiler, der als Test fungiert, müsste ansonsten alles Licht durchgelassen werden.<sup>95</sup>

Als abschließende Bemerkung zur Präparation soll der spezielle Begriff des Ensembles geklärt werden. Darunter versteht man eine Menge von sehr vielen gleich präparierten Objekten, die einander nicht beeinflussen.<sup>96</sup>

## Zustand

Durch die Präparation wird ein Objekt in einen bestimmten Zustand gebracht. Aber was bedeutet der Zustandsbegriff überhaupt? Gibt es diesbezüglich eine Unterscheidung zwischen der klassischen Physik und der Quantenphysik? Eine verbale Beschreibung des Zustandsbegriffs stellt sich als schwierig heraus und wird bis zu einem gewissen Grad immer ungenau sein. Eine zufriedenstellende Definition bringen Leonard Susskind und Art Friedman in ihrem Buch »Quantum Mechanics – The Theoretical Minimum«:

*„In classical physics, knowing the state of a system implies knowing everything that is necessary to predict the future of that system...quantum systems are not completely predictable. Evidently, quantum states have a different meaning than classical states. Very roughly, knowing a quantum state means knowing as much as can be known about how the system was prepared...“<sup>97</sup>*

<sup>94</sup> Vgl. ebd. S. 18. [Zugriff am 27.05.2016]

<sup>95</sup> Vgl. ebd. S. 18. [Zugriff am 27.05.2016]

<sup>96</sup> Vgl. ebd. S. 37. [Zugriff am 27.05.2016]

<sup>97</sup> Vgl. Susskind L. und Friedman A. S. 35.

Eine exakte Beschreibung des quantenphysikalischen Zustandbegriffs ist mit mathematischen Hilfsmitteln möglich. Ein Zustand eines Quantensystems wird durch ein Element eines geeigneten Vektorraums dargestellt. In der Regel ist dieser Vektorraum ein Hilbertraum.<sup>98</sup> Diese Definition ist für die Schule allerdings weniger geeignet.

In der Quantenphysik haben Messungen eine Auswirkung auf den Zustand<sup>99</sup>. Daher müssen die Bereiche Präparation, Zustand und Messung bei Quantenexperimenten getrennt werden. Im Bereich des Zustands dürfen keine Beobachtungen vorgenommen werden.<sup>100</sup>

## Messung

Der Messprozess läuft immer nach einem bestimmten Schema ab: Das präparierte Objekt, das sich in einem bestimmten Zustand befindet, wechselwirkt mit der Messapparatur und das einzelne Messergebnis wird registriert. Dieser Vorgang kann sowohl in der klassischen Physik als auch in der Quantenphysik beobachtet werden. In der klassischen Physik gilt folgendes: Wenn eine Reihe von Versuchen durchgeführt wird, und dabei das Objekt immer auf die gleiche Weise präpariert wird, dann findet auch die Wechselwirkung in gleicher Weise statt, und das Ergebnis der Messung ist für alle Versuche in der Versuchsreihe identisch. In der Quantenmechanik ist das anders: Einzelergebnisse hängen in der Regel vom Zufall ab und sind daher nicht reproduzierbar. Es können aber statistische Aussagen über relative Häufigkeiten der Ergebnisse bei oftmaliger Wiederholung des gleichen Experiments getroffen werden.<sup>101</sup>

Der Messprozess im Bereich der Quantenphysik weist noch eine Reihe anderer Besonderheiten auf. Daher wird dieser Begriff in einem eigen Unterkapitel im Detail beschrieben.

### 3.4. Fähigkeit zur Interferenz

Nachdem jetzt einige grundlegende Begriffe geklärt worden sind, kommen wir nun zum zweiten zentralen Begriff der Quantenphysik, der im Rahmen dieses Kapitels bearbeitet wird. Dieser ist die Fähigkeit zur Interferenz und er wurde schon im Kapitel 2 als Wesenszug der Quantenphysik vorgestellt. In diesem Abschnitt wird der Begriff allerdings etwas genauer betrachtet. Einerseits wird auf die Welleneigenschaft der Materie eingegangen und die damit verbundene Zuordnung einer sinnvollen Wellenlänge. Darüber hinaus wird auch auf die Fragestellung eingegangen, ob es sinnvoll ist, Quantenobjekten die Eigenschaft Weg zuzuordnen. Um einen guten Zugang zu den Begriffen im Rahmen des Schulunterrichts zu gewährleisten, wird auf geeignete Experimente beziehungsweise Computersimulationen verwiesen.

---

<sup>98</sup> Vgl. Embacher F. Expertengespräch.

<sup>99</sup> Anm. des Verfassers: Mehr Details in den Unterkapiteln zum Quantenphysikalischen Messprozess.

<sup>100</sup> Vgl. Embacher F. Expertengespräch.

<sup>101</sup> Vgl. Müller R. und Wieser H. a), S. 36f. [Zugriff am 27.05.2016]



## Wellencharakter von Materie

Beugung- und Interferenzphänomene sind typische Anzeichen von Wellenphänomenen und sind den Schülerinnen und Schülern in der Regel schon aus der klassischen Mechanik, der Akustik oder aus der Optik bekannt. Es gibt jedoch eine große Anzahl an Experimenten mit Quantenobjekten, wie zum Beispiel Elektronen, die ebenfalls Interferenzmuster aufweisen.

Es stellt sich die Frage, ob die Natur so symmetrisch aufgebaut ist, dass sich Wellenphänomene generell auch bei Objekten nachweisen lassen, denen man normalerweise Teilchencharakter zuschreibt. Dieser Gedanke einer Wellennatur von Materie basiert auf Louis de Broglie.<sup>102</sup>

Als Zugang zur Interferenzfähigkeit von Quantenobjekten, denen man üblicherweise Teilchencharakter zuschreibt, können Elektronen herangezogen werden. Ein passendes Experiment wäre eine Elektronenbeugungsröhre. In idealen Fällen kann man in einem gut ausgestatteten Physikkabor in der Schule auf eine Elektronenbeugungsröhre zurückgreifen. Falls das nicht möglich ist, muss man auf Computersimulationen<sup>103</sup> zurückgreifen.

In einer Elektronenbeugungsröhre emittiert eine mit 6V geheizte Kathode Elektronen. Diese durchlaufen eine Beschleunigungsspannung  $U_B = 5kV$ . Sie werden von den nacheinander angeordneten Elektroden  $K_1, K_2$  und  $A_1$  gebündelt. In der durchbohrten Anode  $A_2$  durchläuft der Strahl eine dünne Folie aus polykristallinen Graphit. Auf dem Leuchtschirm erkennt man mehrere helle Ringe um den zentralen Fleck in der Mitte. Eine Vergrößerung von  $U_B$  bewirkt eine Verkleinerung der Radien. In der nachstehenden Abbildung sind eine Versuchsskizze und ein qualitatives Beugungsmuster ersichtlich.<sup>104</sup>

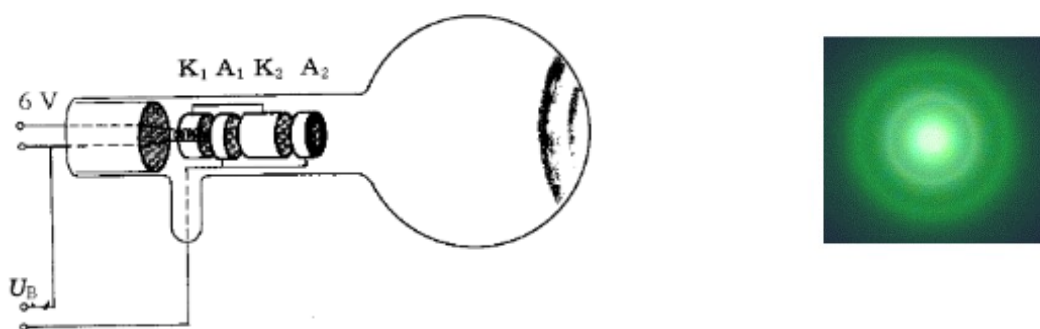


Abbildung 13 Elektronenbeugungsröhre mit Beugungsmuster<sup>105</sup>

<sup>102</sup> Vgl. ebd. S. 39. [Zugriff am 10.06.2016]

<sup>103</sup> Anm. des Verfassers: In weiterer Folge wird auf ein konkretes Computersimulationsprogramm für das Doppelspaltexperiment verwiesen. Das kann als Ersatz an dieser Stelle dienen.

<sup>104</sup> Vgl. ebd. S. 39. [Zugriff am 10.06.2016]

<sup>105</sup> Vgl. ebd. S. 40. [Zugriff am 10.06.2016]

Das Experiment mit der Elektronenbeugungsröhre zeigt auf Grund des auftretenden Beugungsmusters, dass Materie unter speziellen Bedingungen Welleneigenschaften besitzt. Eine grundlegende Größe zur Charakterisierung einer Welle ist die Wellenlänge. Es stellt sich jetzt die Frage, welche Wellenlänge den Elektronen zugeschrieben werden soll! Louis de Broglie gab einen Ausdruck für diese Wellenlänge an.

Man erhält ihn durch eine Analogiebetrachtung mit dem Fall von Photonen, für die Formel (5) gilt. Unter Berücksichtigung der Beziehung zwischen Wellenlänge  $\lambda$  und der Frequenz  $f$  von Licht, die durch  $\lambda \cdot f = c$  gegeben ist, ergibt sich der folgende Zusammenhang zwischen Wellenlänge  $\lambda$  und Impuls  $p$  bei Photonen: <sup>106</sup>

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (7)$$

In der Analogie zwischen Photonen und Elektronen stellte de Broglie die Hypothese auf, dass diese für Photonen abgeleitete Beziehung auch für Elektronen gilt. Diese Hypothese muss natürlich experimentell getestet werden. Das kann mit dem Experiment der Elektronenbeugungsröhre auch geschehen. Die Rechnungen, die bei der Verifizierung verwendet werden, lassen sich mit Hilfe der mathematischen Methoden der Sekundarstufe II problemlos durchführen. Man benötigt dabei Winkelfunktionen und Informationen über die Struktur von Graphen. <sup>107</sup>

Die Berechnung wird im Schulunterricht einiges an Zeit benötigen und ist für ein rein phänomenologisches Verständnis aus Sicht des Verfassers nicht unbedingt notwendig. Darum wird die Rechnung an dieser Stelle nicht präsentiert.

## Quantenobjekte und die Eigenschaft Weg

Neben der Elektronenbeugungsröhre gibt es eine große Anzahl von weiteren Quantenexperimenten, welche ebenfalls Interferenzmuster aufweisen. Diese werden auch dann beobachtet, wenn sich nur ein einzelnes Quantenobjekt in der Versuchsanordnung befindet. Die entsprechenden Interferenzmuster sind dabei zu Beginn nicht ersichtlich, weil die Ortsmessung eines Quantenobjekts bei einem geeigneten Detektor nur einen repräsentativen »Detektionspunkt« liefert. Bei fortlaufender Experimentierdauer baut sich an den Detektoren allerdings nach und nach ein Muster auf, welches mit den Beobachtungen von klassischen Interferenzmustern übereinstimmt.

Bei jedem dieser Experimente gibt es für das Eintreten eines bestimmten Versuchsergebnisses mehrere »klassisch denkbare« Möglichkeiten. <sup>108</sup>

---

<sup>106</sup> Vgl. ebd. S. 43. [Zugriff am 10.06.2016]

<sup>107</sup> Vgl. Müller R. und Wieser H. a), S. 43. [Zugriff am 10.06.2016]

<sup>108</sup> Vgl. Küblbeck und Müller (2003), S. 30.

Um das Verständnis für den zentralen Begriff der Interferenz noch etwas zu vertiefen, soll an dieser Stelle eine Versuchsanordnung mit einzelnen Quantenobjekten dienen. Es soll geklärt werden, was es bedeutet, dass für das Auftreten von Interferenzerscheinungen mehrere »klassisch denkbare« Realisierungen für das Eintreten eines Versuchsergebnisses notwendig sind. Zusätzlich wird geklärt, ob es sinnvoll ist, Quantenobjekten die Eigenschaft Weg zuzuordnen. Es wird dabei auf das didaktisch bewährte Doppelspaltexperiment zurückgegriffen. Es kann mit beliebigen, hinreichend »teilchenartigen« Quantenobjekten durchgeführt werden.

Es ist dabei anzumerken, dass die reale Durchführung eines solchen Experiments mit einzelnen Quantenobjekten im Schulunterricht dabei in der Regel nicht realisierbar ist. Selbst Interferenzexperimente mit einzelnen Photonen stoßen in der Praxis auf Schwierigkeiten. Die Erzeugung von extrem »verdünntem« Licht ist im Prinzip einfach und kann mit Graufiltern geschehen, aber das Problem ist der experimentelle Nachweis einzelner Photonen. Der experimentelle Aufwand ist dabei so groß, dass ein solches Experiment mit den Mitteln der Schulphysik kaum durchzuführen ist. Um nicht ausschließlich auf die Diskussion mit Gedankenexperimenten angewiesen zu sein, gibt es Computersimulationen, auf die zurückgegriffen werden kann.<sup>109</sup>

Eine mögliche Computersimulation zum Doppelspaltexperiment, auf die im Schulunterricht zurückgegriffen werden kann ist im Internetportal »milq« unter dem folgenden Link verfügbar: <http://www.milq-physik.de/Simulationsprogramme>

Die nachstehende Abbildung zeigt den grundsätzlichen Aufbau des Doppelspaltexperiments, welcher in der Computersimulation verwendet wird. Die Simulation steht repräsentativ für real durchgeführte Experimente und kann mit unterschiedlichen Quantenobjekten durchgeführt werden:

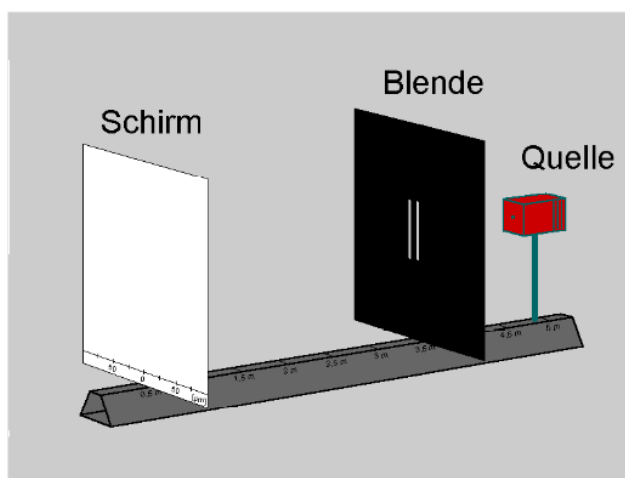


Abbildung 14 Doppelspaltexperiment – Simulationsaufbau<sup>110</sup>

<sup>109</sup> Vgl. Müller R. und Wieser H. b), S. 2. [Zugriff am 10.06.2016]

<sup>110</sup> Vgl. Müller R. und Wieser H. a), S. 34. [Zugriff am 10.06.2016]

Einzelne Quantenobjekte werden auf einen Doppelspalt geschossen und anschließend wird der Ort am Schirm markiert, an dem das Quantenteilchen detektiert wird. Wenn beide Spalten geöffnet sind und der Versuch für ein großes Ensemble durchgeführt wird, so ergibt sich das folgende Interferenzbild:<sup>111</sup>

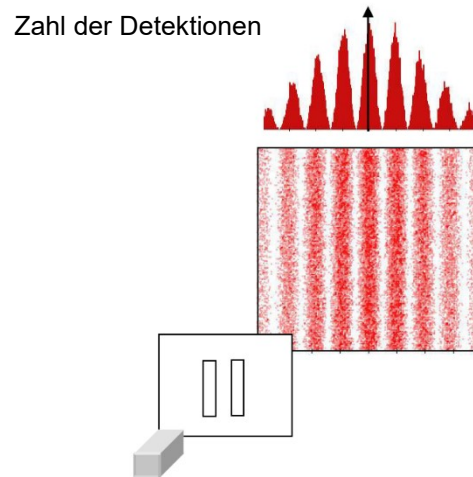


Abbildung 15 Interferenzmuster Doppelspalt<sup>112</sup>

Die geöffneten Spalten können mit dem Begriff der »klassisch denkbaren« Möglichkeiten in Verbindung gebracht werden. Das Quantenteilchen kann einen dieser beiden »klassisch denkbaren« Wege wählen, um zum Schirm zu gelangen. Dabei ist es von Bedeutung, dass es zwei unterschiedliche »klassisch denkbare« Realisierungsmöglichkeiten für das Messergebnis gibt. Schließt man entweder den rechten oder den linken Spalt, so ergibt sich bei der Durchführung des Experiments kein Interferenzmuster, sondern es ergeben sich zwei Einzelspaltverteilungen. Diese sind in der nachfolgenden Abbildung gezeigt:

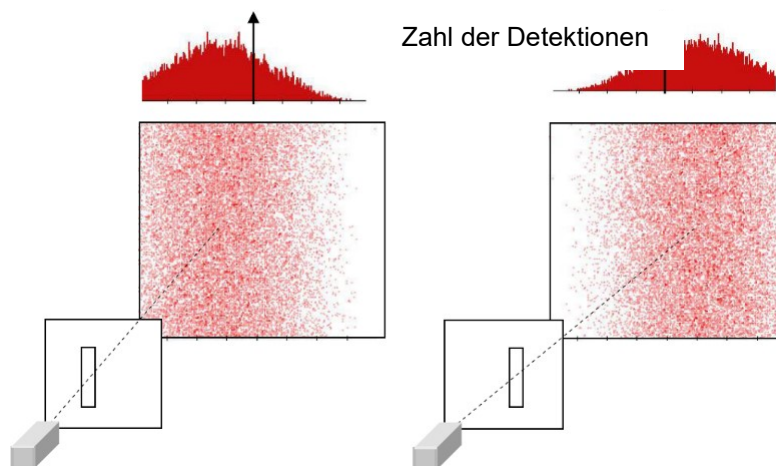


Abbildung 16 Einzelspaltverteilungen<sup>113</sup>

<sup>111</sup> Anm. des Verfassers: Die im Anschluss gezeigten Abbildungen zum Doppelspaltexperiment sind als qualitatives Anschauungsmaterial zu verstehen.

<sup>112</sup> Vgl. Küblbeck und Müller (2003), S. 31.

<sup>113</sup> Vgl. ebd. S. 31.

Es soll nun gezeigt werden, warum es nicht sinnvoll ist, vom »Verhalten« der Quantenteilchen zu sprechen, also darüber, ob es sich durch den linken oder den rechten Spalt bewegt, sondern diese Möglichkeiten nur als »klassisch denkbar« zu bezeichnen. Wenn man den rechten oder den linken Spalt schließt, so ergibt sich die entsprechende Einzelspaltverteilung. Wenn man davon ausgeht, dass jedes Atom entweder durch den linken oder durch den rechten Spalt fliegt, dann müsste in logischer Konsequenz bei zwei geöffneten Spalten eine additive Überlagerung erfolgen. Tatsächlich beobachtet man aber ein Interferenzmuster. Die nachfolgende Abbildung stellt das klassisch zu erwartende Ergebnis dem Interferenzmuster gegenüber:<sup>114</sup>

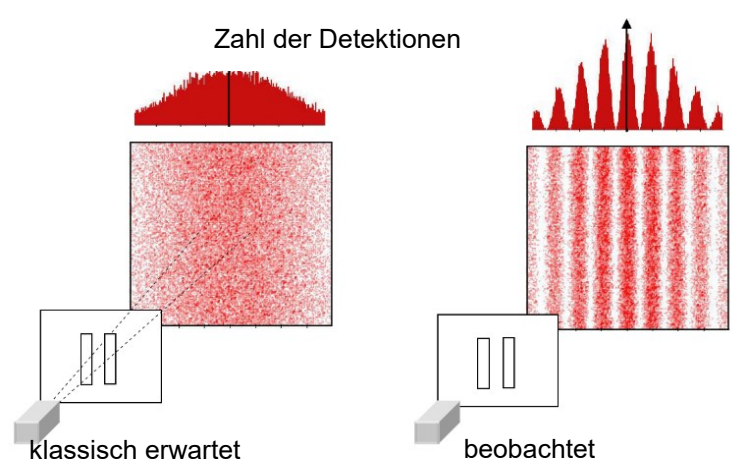


Abbildung 17 Summe der Einzelspaltverteilungen – Interferenzmuster<sup>115</sup>

Man bekommt also Schwierigkeiten, wenn man sich vorstellt, dass die Teilchen entweder links oder rechts durch den Spalt gehen. Tatsächlich führt jede Vorstellung darüber, wie die Teilchen zum Schirm gelangen, zu Widersprüchen. Auch die Vorstellung, dass sich das Teilchen teilt und beide Möglichkeiten gleichzeitig realisiert werden, ist falsch. Dies wurde mit Hilfe von »Delayed-Choice« Experimenten gezeigt.

Da jede Vorstellung darüber, wie ein Teilchen von der Quelle zum Schirm kommt, falsch ist, soll darüber auch nicht mehr gesprochen werden. Man kann auch sagen, dass es nicht sinnvoll ist, den Quantenteilchen die Eigenschaft Weg zuzuordnen.<sup>116</sup>

## Phänomenologie und Mathematik

Aus Sicht des Verfassers bieten das abgehandelte Experiment und die vorgestellte Computersimulation eine gute Möglichkeit, den zentralen Begriff der Interferenz zugänglich zu machen. Auch an dieser Stelle ergibt sich ein fast ausschließlich phänomenologischer Ansatz, der mit einem Minimum an mathematischen Hilfsmitteln auskommt.

<sup>114</sup> Vgl. ebd. S. 30f.

<sup>115</sup> Vgl. ebd. S. 31.

<sup>116</sup> Vgl. ebd. S. 31.

### 3.5. Stochastische Vorhersagbarkeit

In diesem Unterkapitel wird der dritte zentrale Begriff der Quantenphysik bearbeitet. Dieser ist die stochastische Vorhersagbarkeit von Quantenexperimenten. Als Einleitung zu diesem Aspekt kann der radioaktive Kernzerfall als bekanntes Alltagsbeispiel gebracht werden. Das ist ein quantenphysikalischer Prozess, bei dem es nicht möglich ist, eine Vorhersage zu treffen, wann ein einzelner Kern zerfallen wird. Aber je größer die Anzahl der betrachteten Atomkerne ist, desto besser stimmt die Wahrscheinlichkeitsaussage, dass nach einer Stunde die Hälfte der Kerne zerfallen ist. In dieser Hinsicht ist es auch sinnvoll, dass man radioaktiven Elementen eine Halbwertszeit zuordnet.<sup>117</sup>

In weiterer Folge kann als anschaulicher Zugang wieder die im Unterkapitel 3.4 beschriebene Computersimulation zum Doppelspaltexperiment mit Quantenobjekten herangezogen werden. Der experimentelle Aufbau der Simulation wird dabei wie zuvor gewählt.

Die Simulation wird gestartet und jedes Quantenteilchen hinterlässt einen punktförmigen Fleck an einer zufälligen Stelle auf dem Schirm. Es kann festgestellt werden, dass sich nach und nach ein Interferenzmuster herausbildet, je mehr Photonen nachgewiesen werden. Der allmähliche Aufbau des Interferenzmusters lässt sich gut in der nachfolgenden Abbildung erkennen:<sup>118</sup>

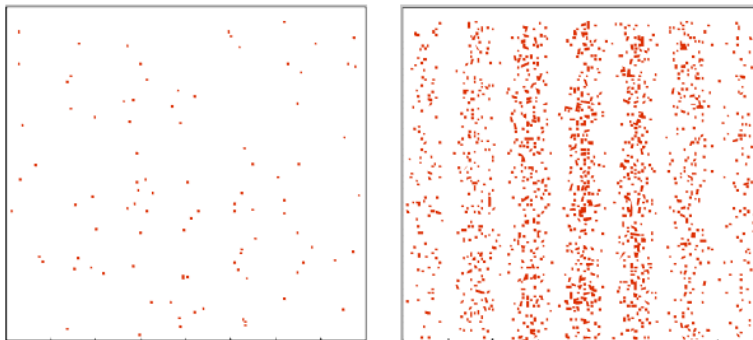


Abbildung 18 Allmählicher Aufbau des Doppelspalt Interferenzmusters<sup>119</sup>

Wenn man den Versuch wiederholt und die Quelle für eine kurze Zeit einschaltet, dann erscheint ein neuer Fleck auf dem Schirm. Der neue Aufschlagort ist aber vom Zufall abhängig und es ist nicht möglich, den exakten Ort vorherzusagen. Wenn man aber eine große Menge an Quantenteilchen betrachtet und eine Vorhersage darüber treffen sollte, an welchen Stellen viele auftreten und wo wenig, dann kann man eine vernünftige Aussage treffen. Es wurde von einer Aussage über Einzelereignisse zu einer Wahrscheinlichkeitsaussage übergegangen.<sup>120</sup>

<sup>117</sup> Vgl. ebd. S. 27.

<sup>118</sup> Vgl. Müller R. und Wieser H. a) S. 35. [Zugriff am 10.06.2016]

<sup>119</sup> Vgl. ebd. S. 35f. [Zugriff am 10.06.2016]

<sup>120</sup> Vgl. ebd. S. 35f. [Zugriff am 10.06.2016]

Als Alternative zum Doppelspaltexperiment kann man einen experimentellen Aufbau anhand des Mach-Zehnder-Interferometers wählen. Damit kann die Interferenz von Licht demonstriert werden und im Extremfall auch die Interferenz einzelner Photonen. Wie zuvor gilt hier allerdings auch die Problematik bei der Realisierung des Versuchsaufbaus mit einzelnen Quantenteilchen. Daher wird auch hierbei auf Computersimulationen zurückgegriffen werden müssen. Eine Prinzipskizze des Aufbaus und der Funktionsweise des Mach-Zehnder-Interferometers ist in der nachfolgenden Abbildung ersichtlich:

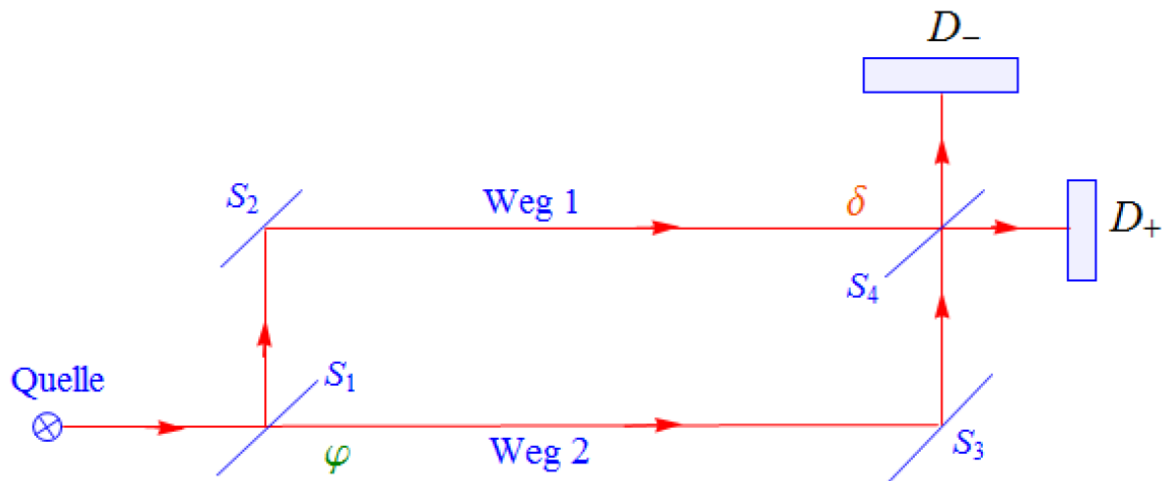


Abbildung 19 Das Mach-Zehnder-Interferometer - Prinzipskizze<sup>121</sup>

Das Experiment lässt sich aus klassischer Sicht wie folgt beschreiben: Monochromatisches, nicht polarisiertes Licht wird von einer Quelle auf einen Strahlteiler  $S_1$  geschickt. Dieser spaltet den Lichtstrahl zu gleichen Teilen in einen transmittierten und einen reflektierten Strahl auf. Der obere Teilstrahl, sowie der untere Teilstrahl werden jeweils an einem Spiegel  $S_2, S_3$  reflektiert und treffen auf einen zweiten Strahlteiler  $S_4$ . Am Ende der beiden möglichen Ausgänge für die Lichtstrahlen findet eine Überlagerung der jeweiligen Teilstrahlen statt, bevor sie an den jeweiligen Detektoren  $D_+$  bzw.  $D_-$  gemessen werden. Zusätzlich sind in den beiden Wegen Vorrichtungen angebracht, die Phasensprünge  $\varphi, \delta$  in den Teilstrahlen bewirken.<sup>122</sup>

Unter klassischer Betrachtung, also mit makroskopischen Lichtintensitäten, lässt sich für beliebige Phasenverschiebungen  $\varphi, \delta$  eine allgemeine Formel herleiten, die zur Vorhersage der entsprechenden Intensitäten  $I_{\pm}$  an den Detektoren  $D_+$  bzw.  $D_-$  verwendet werden kann. Es ergibt sich:<sup>123</sup>

$$I_{\pm} = \frac{1}{2} I_0 (1 \pm \cos(\varphi - \delta)) \quad (8)$$

<sup>121</sup> Vgl. Embacher F. Expertengespräch.

<sup>122</sup> Vgl. ebd.

<sup>123</sup> Vgl. ebd.

In weiterer Folge betrachten wir das Mach-Zehnder-Interferometer als Quantensystem, indem die Lichtintensität so weit gedrosselt wird, dass nur einzelne Photonen in größeren Zeitabständen ausgesandt werden. Jedes Mal, wenn ein Photon auf einen Detektor trifft, so »klickt« dieser. Bei der Durchführung mit einzelnen Photonen ergeben sich folgende Beobachtungen:

- Wenn die Quelle ein Photon in den Strahlengang schickt, so klickt nur ein Detektor. Ein Photon spaltet sich also offenbar nicht auf.
- Wird das Experiment mit gleichem Aufbau oft wiederholt, so ist die Zahl der Klicks der beiden Detektoren proportional zu den zuvor hergeleiteten Intensitäten  $I_{\pm}$  für Lichtwellen, und zwar umso genauer, je größer die Zahl der Versuchsdurchgänge ist.
- Wann immer der Versuchsaufbau so gewählt wurde, dass die Intensitäten  $I_{\pm}$  von 0 verschieden sind, so klicken die Detektoren in unregelmäßiger Reihenfolge. Der Vorgang sieht wie ein Zufallsprozess aus.<sup>124</sup>

Dieses Experiment ist mathematisch schwieriger zu beschreiben als die zuvor erwähnte Doppelspalt-Simulation und somit aus Sicht des Verfassers unter phänomenologischen Gesichtspunkten nicht so gut geeignet. Allerdings ermöglicht dieser Zugang einen guten Einstieg in die quantitative Aufgabe der Quantenphysik. Daher ist dieses Experiment als ein Bindeglied zum Nachfolgenden Kapitel 4 zu sehen, wo all diejenigen Aspekte der Quantenmechanik behandelt werden, die mit einem rein phänomenologischen Zugang nicht gut vermittelt werden können.

Beide gezeigten Experimente zeigen auf jeden Fall die statistische Aussage der Quantenmechanik. Rainer Müller und Hartmut Wiesner haben diese Aussage in einem übersichtlichen Merksatz zusammengefasst:

*„Die Quantenphysik macht statistische Aussagen über die relative Häufigkeit der Ergebnisse bei oftmaliger Wiederholung des gleichen Experiments. Aussagen über Einzelereignisse sind im Allgemeinen nicht möglich.“<sup>125</sup>*

Unter Betrachtung dieser Tatsache kann als abschließender Gedanke zu diesem zentralen Begriff der Quantenphysik noch der folgenden Fragestellung nachgegangen werden: Bedeutet dieses Ergebnis, dass mit der Quantenphysik die Vorhersagbarkeit von experimentellen Ereignissen, die einen Grundpfeiler der Physik darstellt, ihre Gültigkeit verliert? Obwohl es auf dem ersten Blick so scheinen mag, ist es nicht der Fall. Die Physik beschäftigt sich nicht mit Einzelereignissen, sondern nur mit reproduzierbaren Phänomenen. In der Quantenphysik sind die statistischen Aussagen reproduzierbar. Jedes Mal, wenn die gleiche Serie von vielen Experimenten durchgeführt wird, ergibt sich dieselbe Verteilung von relativen Häufigkeiten.<sup>126</sup>

---

<sup>124</sup> Vgl. ebd.

<sup>125</sup> Vgl. Müller R. und Wiesner H. a) S. 37. [Zugriff am 10.06.2016]

<sup>126</sup> Vgl. ebd. S. 37.



## Phänomenologie und Mathematik

Aus Sicht des Verfassers lässt sich auch der zentrale Begriff der stochastischen Vorhersagbarkeit gut mit Hilfe eines phänomenologischen Zugangs vermitteln. Das anfängliche Beispiel des Kernzerfalls und die Doppelspaltsimulation sind gut dafür geeignet. Darüber hinaus wurde ein Ausblick auf das Kapitel 4 gegeben, weil die quantitative Bestimmung von Wahrscheinlichkeitsaussagen in der Regel nicht ohne mathematische Formalismen möglich ist.

### 3.6. Der quantenphysikalische Messprozess

An dieser Stelle wird nun auf den vierten zentralen Begriff der Quantenphysik eingegangen, den man mit einem phänomenologischen Ansatz vermitteln kann. Bei der genaueren Bearbeitung dieses Aspektes wird auf zwei Besonderheiten genauer eingegangen: Einerseits auf die eindeutigen Messergebnisse, die sich beim Messprozess immer einstellen, und andererseits auf die Verknüpfung des quantenmechanischen Messprozesses mit dem Wesenszug der Komplementarität. Dabei wird auch darauf eingegangen, wie der Messprozess Einfluss auf den Quantenzustand nimmt, und es wird auch der Begriff der Zustandsreduktion angesprochen.

Als Zugangspunkt für den Schulunterricht wird dabei wiederum das Doppelspaltexperiment herangezogen, welches schon in den beiden vorangegangenen Kapiteln dieser Arbeit verwendet wurde. Allerdings wird es in diesem Kapitel kleinere Adaptionen dazu geben.

#### Eindeutige Messergebnisse

Bereits im Unterkapitel 3.4 wurde festgehalten, dass es beim Doppelspaltexperiment nicht sinnvoll ist, Quantenobjekten die Eigenschaft Weg zuzuordnen. Es wurden alle Vorstellungen aufgegeben, wie die Objekte von der Quelle zum Schirm gelangen. Allerdings liefert die Ortsmessung am Schirm immer ein bestimmtes Ergebnis. Es stellt sich also die interessante Frage, was geschieht, wenn man je ein Messgerät direkt hinter den Spalten aufstellt.<sup>127</sup>

Um ein Quantenobjekt an einem der Spalte nachzuweisen, genügt es, wenn es eine Markierung am entsprechenden Spalt hinterlässt. Rubidium-Atome können zum Beispiel mit einem geeignet abgestimmten Laser so angeregt werden, dass sie unmittelbar darauf ein Photon im Mikrowellenbereich emittieren.

---

<sup>127</sup> Vgl. Küblbeck und Müller (2003), S. 37.

Mit dieser Grundlage lässt sich ein Versuchsaufbau anordnen, bei dem man zwei Hohlräume  $H_1, H_2$  vor den jeweiligen Spalten platziert. Mit Hilfe von Detektoren kann dann das Photon in den jeweiligen Hohlräumen nachgewiesen werden. Die entsprechende Versuchsanordnung,<sup>128</sup> von oben gesehen, ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt:<sup>129</sup>

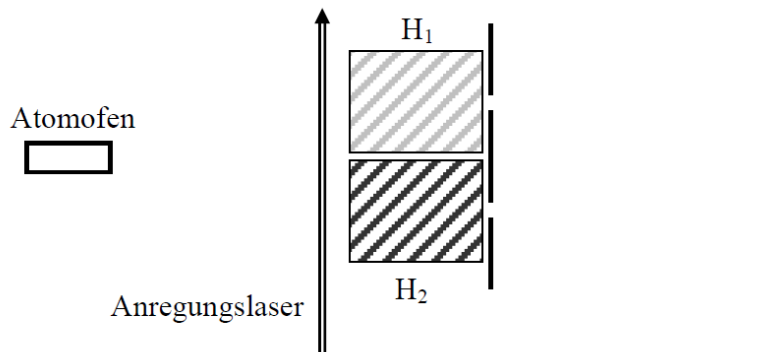


Abbildung 20 Doppelspalt mit Messung an den Spalten<sup>130</sup>

Das Experiment liefert folgendes Ergebnis: Niemals stellt man fest, dass beim Durchflug eines Atoms keiner der Detektoren  $H_1$  und  $H_2$  anspricht, noch dass beide ansprechen. Vielmehr zeigt sich, dass bei jedem Atom genau ein Hohlraum ein Signal gibt. Es ist allerdings anzumerken, dass man zwar schließen kann, dass das Atom am jeweiligen Spalt detektiert wurde, es rechtfertigt aber nicht die Vorstellung, dass das Atom auf einer bestimmten Bahn durch den jeweiligen Spalt geht, ansonsten könnte man nicht das auftretende Einzelspaltmuster erklären.<sup>131</sup>

Der Versuchsaufbau kann auf folgende Art noch adaptiert werden, indem man ein zweites Hohlräume paar  $H_3, H_4$  aufstellt. Der neue Aufbau ist in der nachfolgenden Abbildung ersichtlich:

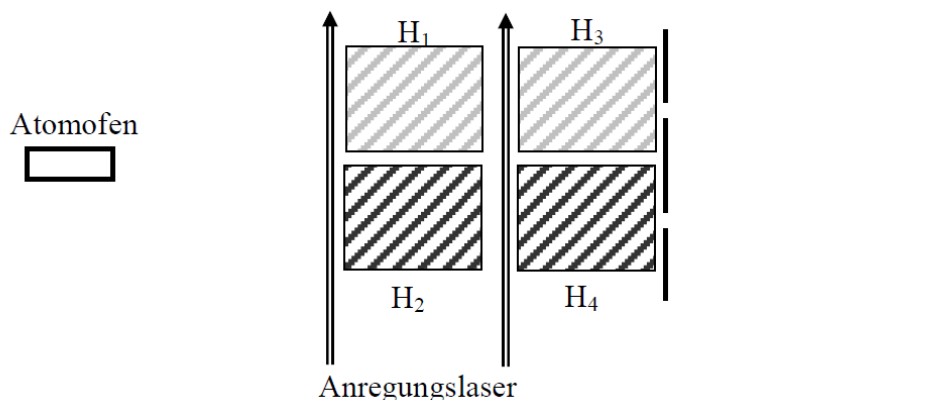


Abbildung 21 Doppelspalt mit zweimaliger Messung an den Spalten<sup>132</sup>

<sup>128</sup> Anm. des Verfassers: Gemäß Küblbeck und Müller wurde dieses Experiment in dieser Form von Scully und Mitarbeitern vorgeschlagen, aber bisher nicht genauso realisiert.

<sup>129</sup> Vgl. Küblbeck und Müller (2003), S. 37.

<sup>130</sup> Vgl. ebd. S. 37.

<sup>131</sup> Vgl. ebd. S. 37.

<sup>132</sup> Vgl. ebd. S. 38.

Es stellt sich folgendes Versuchsergebnis ein: Nach der Detektion des Atoms am Paar  $(H_1, H_2)$ , wird das gleiche Ergebnis am Paar  $(H_3, H_4)$  erhalten. Wenn  $H_1$  ein Signal gibt, gibt auch  $H_3$  ein Signal; gibt  $H_2$  ein Signal, dann auch  $H_4$ .<sup>133</sup>

Die Ergebnisse der beschriebenen Experimente lassen sich in folgendem Merksatz zusammenfassen, der schon im Kapitel 2 als Wesenszug der Quantenphysik formuliert worden ist:

*„Messergebnisse sind stets eindeutig, auch wenn sich das Quantenobjekt in einem Zustand befindet, der unbestimmt bezüglich der gemessenen Größe ist. Eine Wiederholung der Messung am gleichen Quantenobjekt führt zum gleichen Ergebnis, wenn das Quantenobjekt nicht zwischendurch anderweitig beeinflusst wurde.“<sup>134</sup>*

## Komplementarität und Zustandsreduktion

Um den quantenmechanischen Messprozess mit dem Wesenszug der Komplementarität zu verknüpfen, betrachten wir das adaptierte Doppelspaltexperiment mit einem Hohlraumpaar  $(H_1, H_2)$ . Zusätzlich dazu wird diesmal aber auch das Interferenzbild am Schirm beobachtet. Das Experiment wird dabei in zwei Durchgängen durchgeführt: Einmal mit dem Hohlraumpaar  $(H_1, H_2)$  und einmal ohne diesem.

Die Messergebnisse, die in diesen beiden Fällen am Schirm detektiert werden, sind in der nachfolgenden Abbildung gegenüber gestellt. Es zeigt sich dabei, dass das Hohlraumpaar einen Einfluss auf das Messergebnis am Schirm genommen hat:

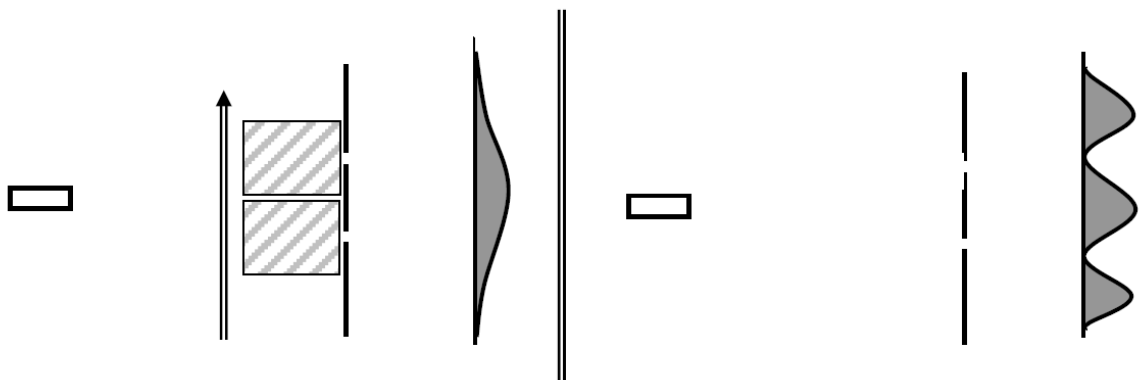


Abbildung 22 Einfluss des Hohlraumpaares auf das Interferenzmuster<sup>135</sup>

<sup>133</sup> Vgl. ebd. S. 38.

<sup>134</sup> Küblbeck und Müller (2003), S. 38.

<sup>135</sup> Vgl. ebd. S. 41.

Das Experiment zeigt, dass man beim Doppelspalt-Experiment mit einer Ortsmessung an den Spalten ein völlig anderes Ergebnis erhält. Statt des Interferenzmusters erhält man die Summe der Einzelspaltverteilungen und ohne Ortsmessung erhält man das Interferenzmuster. Man kann es auch wie folgt formulieren: Interferenzmuster und die Unterscheidbarkeit der »klassisch denkbaren« Möglichkeiten schließen einander aus.<sup>136</sup>

Dies ist ein Spezialfall des allgemeinen Komplementaritätsprinzips das nach Niels Bohr benannt ist. Ein weiterer charakteristischer Zug der Quantenmechanik lässt sich ebenfalls an diesem Experiment ablesen: Schon die Veränderung eines kleinen Teils der Versuchsanordnung reicht unter Umständen aus, um das Versuchsergebnis qualitativ zu verändern. Auch dies war für Bohr ein wichtiges Merkmal der Quantenphysik, das er als die »Ganzheitlichkeit der Quantenphänomene« bezeichnet hat.<sup>137</sup>

Die Tatsache, dass der quantenphysikalische Messprozess einen Einfluss auf den Zustand eines Quantenobjekts hat, ist eine geeignete Überleitung zum Begriff der Zustandsreduktion. Die allgemeine Idee dabei ist grundsätzlich nicht so schwierig zu vermitteln, und das Doppelspaltexperiment, welches in diesem Abschnitt beschrieben worden ist, kann dabei als Erklärungsgrundlage dienen. Ein tieferes Verständnis lässt sich bei diesem Aspekt allerdings nur mit Hilfe der quantenphysikalischen Wellenfunktion erzielen, und die Beschreibung dieser benötigt vergleichsweise schwierige mathematische Hilfsmittel. Daher soll dieser Absatz wieder als kleiner Ausblick für das nachfolgende Kapitel 4 dienen.

## Phänomenologie und Mathematik

Mit Ausnahme des Aspekts der Zustandsreduktion kann aus Sicht des Verfassers auch der zentrale Begriff des quantenphysikalischen Messprozesses gut phänomenologisch zugänglich gemacht werden. Die adaptierte Variante des Doppelspaltversuchs ist gut dafür geeignet und lässt sich mit einer entsprechenden Computersimulation auch anschaulich darstellen.

### 3.7. Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation

Der abschließende zentrale Begriff, der in diesem Kapitel beschrieben wird, hängt eng mit dem Begriff der Komplementarität zusammen und ist die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation. Wie bereits bei den Wesenszügen der Quantenphysik im Kapitel 2 beschrieben, besteht der allgemeine Zusammenhang, dass komplementäre Eigenschaften eines Quantenteilchens sich nicht gleichzeitig beliebig genau messen lassen. Die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation ist dabei ein wichtiger Spezialfall und betrifft die Eigenschaften Ort und Impuls.

---

<sup>136</sup> Vgl. ebd. S. 41f.

<sup>137</sup> Vgl. Müller R. und Wieser H. a) S. 58. [Zugriff am 10.06.2016]

Um einen phänomenologischen Zugangspunkt für den Schulunterricht zu finden, bietet es sich an, dass man als Ausgangspunkt die klassische Physik betrachtet. Dort wird die Bewegung von Teilchen durch die Angabe ihrer Bahnkurve beschrieben. Als Beispiel kann dabei die Bewegung von Kugeln betrachtet werden, die von einer Abschussvorrichtung abgeschossen werden. Die Kugeln bewegen sich immer auf der gleichen Bahn, sofern alle auf die gleichen Anfangsbedingungen präpariert worden sind. Die Eigenschaften Ort und Impuls werden gleichzeitig präpariert.<sup>138</sup>

Im vorherigen Unterkapitel 3.4 hat sich allerdings gezeigt, dass es beim Doppelspaltexperiment nicht sinnvoll ist, den Quantenobjekten eine Eigenschaft Weg zuzuordnen. Das ist schon ein Indiz dafür, dass es bei der gleichzeitigen Präparation von Ort und Impuls bei Quantenteilchen zu Problemen kommen kann.

Prinzipiell ist die Präparation von Eigenschaften auch für Quantenobjekte möglich. Aber es zeigt sich, dass sich in der Quantenphysik Paare von Eigenschaften wie Ort und Impuls gibt deren gleichzeitige Präparation nicht möglich ist.<sup>139</sup>

Um die Unmöglichkeit der gleichzeitigen Präparation von Ort und Impuls zu zeigen, wird ein konkreter Versuch analysiert, der beide Eigenschaften zugleich herstellen soll. Der erste Teil der Versuchsanordnung ist in der nachfolgenden Prinzipskizze ersichtlich:<sup>140</sup>

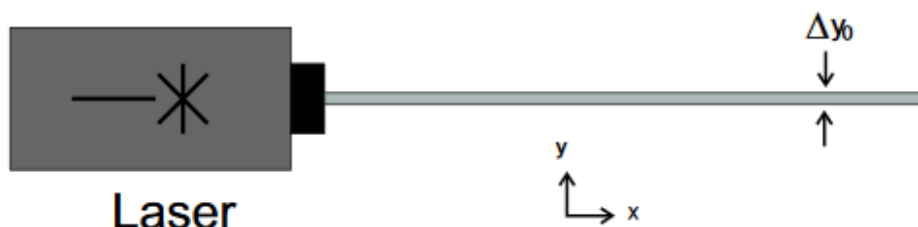


Abbildung 23 Präparation der Ortseigenschaft eines Lasers in y-Richtung<sup>141</sup>

Als Quantenobjekt werden im Versuchsaufbau Photonen eines monochromatischen Laserstrahls verwendet. Da der Strahl sehr gut gebündelt ist, ist die Streuung  $\Delta p_y$  der Messwerte um den Wert  $p_y = 0$  verschwindend gering. Der Laserstrahl besitzt allerdings eine gewisse räumliche Breite in y-Richtung. Misst man diese mit einem räumlich hochauflösenden Detektor, so wird man Photonen innerhalb eines Bereichs der Breite  $\Delta y$  finden.<sup>142</sup>

<sup>138</sup> Vgl. ebd. S. 67.

<sup>139</sup> Vgl. ebd. S. 68.

<sup>140</sup> Vgl. ebd. S. 68.

<sup>141</sup> Vgl. ebd. S. 68.

<sup>142</sup> Vgl. ebd. S. 68.

Man kann nun versuchen, die Streuung der Ortskomponente  $y$  zu reduzieren. Dazu kann man den Laserstrahl durch einen engen Spalt der Breite  $d$  schicken. Dieser zweite Teil der Versuchsanordnung ist in der nachfolgenden Prinzipskizze ersichtlich:

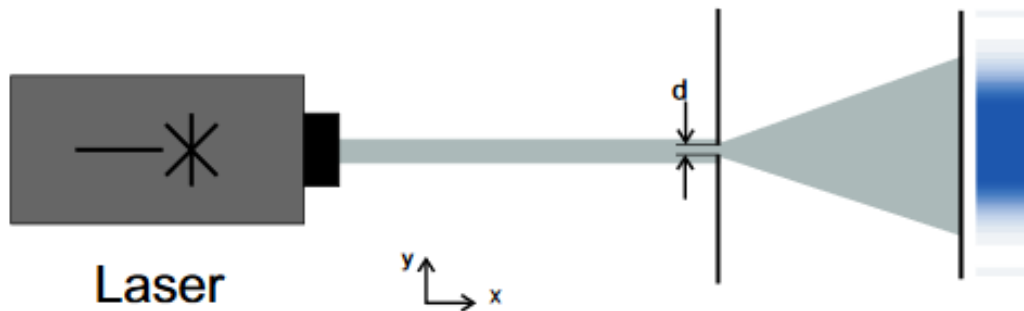


Abbildung 24 Aufweitung des Laserstrahls an einem engen Spalt<sup>143</sup>

Wenn man den Laserstrahl auf den engen Spalt fallen lässt, so zeigt sich, dass sich der Strahl hinter dem Spalt ausweitet. Je enger der Spalt ist, desto größer ist die Ausweitung. Es handelt sich hier um die aus der Optik bekannte Beugung eines Lichtbündels am Spalt. Das Ergebnis des Experiments veranschaulicht, dass es nicht möglich ist, Ort und Impuls des Laserstrahls beliebig genau zu präparieren. Die Ortsstreuung der Photonen unmittelbar hinter dem Spalt konnte mit dem Spalt zwar verringert werden, aber damit verbunden ist leider auch eine Vergrößerung der Impulsstreuung. Die allmähliche Ausweitung des Strahls hinter dem Spalt zeigt, dass die Photonen nicht mehr gebündelt sind. Bei der Messung streuen die Impulse nun in Querrichtung.<sup>144</sup>

Somit lässt sich die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation in Worte fassen:

*„Es ist nicht möglich, ein Ensemble von Quantenobjekten gleichzeitig auf Ort und Impuls zu präparieren.“<sup>145</sup>*

## Phänomenologie und Mathematik

Der zentrale Aspekt der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation lässt sich anhand des beschriebenen Versuchsaufbaus im Schulunterricht gut mit Hilfe des phänomenologischen Ansatzes präsentieren.

<sup>143</sup> Vgl. ebd. S. 69.

<sup>144</sup> Vgl. ebd. S. 69.

<sup>145</sup> Müller R. und Wieser H. a) S.69. [Zugriff am 10.06.2016]

### 3.8. Zusammenfassung

In diesem Kapitel hat sich aus Sicht des Verfassers gezeigt, dass einige zentrale Aspekte der Quantenphysik auch auf Basis eines phänomenologischen Ansatzes konzeptuell richtig zugänglich gemacht werden können. Die genannten Begriffe waren dabei nicht zufällig gewählt, sondern basieren auf den im Kapitel 2 genannten Wesenszügen der Quantenphysik von Josef Küblbeck und Rainer Müller. Die Wesenszüge Quantisierung, stochastische Vorhersagbarkeit, Fähigkeit zur Interferenz, eindeutige Messergebnisse, sowie Komplementarität wurden dabei in diesem Kapitel 3 umfassend behandelt.

Die vorgestellten Begriffe bilden aus Sicht des Verfassers eine solide Basis für das Verständnis der Quantenphysik. Es ist daher vom Verfasser angedacht, dass der Inhalt dieses Kapitels als Grundlage für ein Unterrichtskonzept der Quantenphysik in der Sekundarstufe II verwendet werden kann. Ein Vergleich mit dem derzeitigen Stand der Forschung wird im Rahmen des abschließenden Kapitels durchgeführt. Zusätzlich dazu wurde ein Experteninterview mit einer Lehrerin des »borg3« durchgeführt, dessen Ergebnis auch in diesen Vergleich einfließt.

Darüber hinaus hat es in diesem Kapitel zwei Stellen gegeben, die gezeigt haben, dass der phänomenologische Zugang zur Quantenphysik nur als Verständnisbasis dienen kann. Gerade bei der quantitativen Beschreibung von Quantenexperimenten stößt man ohne den entsprechenden mathematischen Formalismus an seine Grenzen. Es wurde in diesem Kapitel auch nicht auf den Wesenszug der Verschränkung eingegangen. Dieser ist aus Sicht des Verfassers auch nur mit mathematischen Hilfsmitteln korrekt erfassbar. Das nachfolgende Kapitel 4 beschäftigt sich im Anschluss mit solchen zentralen Begriffen, die sich nicht mit einem rein phänomenologischen Ansatz vermitteln lassen können.

## 4. Zentrale Aspekte der Quantenphysik – Mathematik

Im vorherigen Kapitel wurde auf all jene zentralen Begriffe der Quantenphysik eingegangen, die aus Sicht des Verfassers mit einem phänomenologischen Ansatz in der Sekundarstufe II zufriedenstellend zugänglich gemacht werden können. Dieses Kapitel hat nun zum Ziel, die Grenzen eines rein phänomenologischen Zugangs zur Quantenphysik aufzuzeigen, indem Beispiele von zentralen Aspekten gebracht werden, deren konzeptuell richtiges Verständnis ein mathematisches Rüstzeug benötigt, welches den Schulstoff in der Regel übersteigt.

Dabei wird zu Beginn dieses Kapitels auf eine bekannte physikalische Problemstellung der Vergangenheit eingegangen, die auch als eine der Geburtsstunden der Quantenphysik gilt. Die Problemstellung betrifft die Wärmestrahlung eines schwarzen Körpers und den damit in Verbindung stehenden klassischen Beschreibungsversuch, der zur so genannten »Ultraviolett-Katastrophe« führt. Mit diesem Unterkapitel soll gezeigt werden, dass nicht jeder Einstieg in die Quantenphysik für die Schule geeignet ist.

In der weiteren Folge werden dann zwei Aspekte der Quantenphysik beschrieben, die aus Sicht des Verfassers von zentraler Bedeutung sind, aber sich einem rein phänomenologischen Zugang entziehen:

Einerseits wird auf die quantitative Aufgabe der Quantenphysik eingegangen. Ein qualitatives Verständnis von Phänomenen bietet zwar eine solide Verständnisbasis, allerdings ist eine zusätzliche Aufgabe der Physik auch die quantitative Beschreibung von Systemen. In diesem Rahmen wird auf den mathematischen Formalismus eingegangen, welcher die quantitative Beschreibung von Quantensystemen möglich macht. Dabei werden relativ rasch Grenzen aufgezeigt, die mit den Mitteln der Schulmathematik nicht mehr überwunden werden können.

Weiteres wird der Begriff der Quantenverschränkung genauer erarbeitet. Dieser wurde schon im Kapitel 2 als Wesenszug der Quantenphysik beschrieben. An dieser Stelle soll der Begriff der Verschränkung mit dem bekannten Katzenparadoxon von Schrödinger in Verbindung gebracht werden. Anschließend wird auf eine Lösung des Paradoxons mit Hilfe der Dekohärenztheorie eingegangen.

An dieser Stelle soll auch erwähnt werden, dass dieses Kapitel als Ausblick gedacht ist. Es soll gezeigt werden, dass der im Kapitel 3 beschriebene phänomenologische Zugang zu bestimmten zentralen Begriffen der Quantentheorie nur als Verständnisbasis dienen kann. Über diese Basis hinaus gibt es allerdings noch viele faszinierende Phänomene der Quantenphysik, die man nur mit einem entsprechenden mathematischen Formalismus umfassend verstehen kann. In dieser Hinsicht stellen die beiden Aspekte, die in diesem Kapitel beschrieben werden, auch keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Sie dienen nur als zwei wichtige und anschauliche Beispiele.



## 4.1. Die Ultraviolett-Katastrophe

Ein klassischer Beschreibungsversuch der Wärmestrahlung eines schwarzen Körpers führt zur sogenannten Ultraviolett-Katastrophe. Die Lösung dieser Problemstellung gelang Planck mit seiner »Planck'schen Quantenhypothese«. Diese gilt auch als einer der Ausgangspunkte der Quantenphysik.

Die genannte Problemstellung wird in manchen Schulbüchern als Einstieg in die Quantenphysik gebracht. Als Beispiel kann das Schulbuch »Physik compact, Basiswissen 8« genannt werden. Aus Sicht des Verfassers ist dieser Zugang allerdings schwierig im Schulunterricht zu vermitteln, da das Verständnis ein abstraktes Modell benötigt und auch ein gewisses Rüstzeug an Mathematik voraussetzt. Daher soll die Problemstellung zusammen mit der Lösung mit Hilfe der »Planck'schen Quantenhypothese« in diesem Unterkapitel präsentiert werden.

### Wärmestrahlung – Das Rayleigh-Jeans-Gesetz

Jeder Körper sendet auf Grund der thermischen Molekularbewegung elektromagnetische Strahlung aus, die auch als Wärmestrahlung bezeichnet wird. Bei einem Körper im thermodynamischen Gleichgewicht entsprechen einander Absorption und Emission von Strahlung. Je höher der Absorptionsgrad eines Körpers, desto stärker ist auch die Strahlungsemission des Körpers. Dies wird auch als »Kirchhoff'sches Strahlungsgesetz« bezeichnet. Ein Körper mit Emissionsgrad  $\varepsilon = 1$  absorbiert einfallende Strahlung vollständig und erscheint daher schwarz. Ein idealer schwarzer Körper kann in guter Näherung durch einen Hohlraum mit kleiner Öffnung in den Außenraum realisiert werden. Diese Strahlung des schwarzen Körpers wird daher als Hohlraumstrahlung bezeichnet.<sup>146</sup>

Es wird nun ein würfelförmiger Hohlraum betrachtet, der elektromagnetische Hohlraumstrahlung im thermischen Gleichgewicht enthält. Es können sich im Gleichgewicht nur stehende Wellen ausbilden und die gesamte Hohlraumstrahlung setzt sich daher aus diskreten Schwingungszuständen zusammen. Die Anzahl möglicher Schwingungszustände nimmt mit steigenden Frequenzen  $\nu$  zu, weil es sichtlich für kürzere Wellenlängen mehr Möglichkeiten gibt, sich in den Hohlraum einzupassen. Jeder Schwingungszustand kann als harmonischer Oszillator aufgefasst werden, der insgesamt die mittlere Energie  $k_B T$  hat. Dabei steht  $T$  für die Temperatur und  $k_B$  für die Boltzmann-Konstante. Für die Energiedichte der Hohlraumstrahlung im Frequenzintervall  $[\nu, \nu + d\nu]$  ergibt sich das Rayleigh-Jeans-Gesetz:<sup>147</sup>

$$\rho(\nu, T) \cdot d\nu = k_B T \cdot \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \cdot d\nu \quad (9)$$

---

<sup>146</sup> Vgl. Wagner (2012), S. 211.

<sup>147</sup> Vgl. ebd. S. 211f.

## UV-Katastrophe

Es zeigt sich, dass dieses Gesetz für große Wellenlängen und entsprechend niedrigen Frequenzen  $\nu$  gut mit den experimentellen Befunden übereinstimmt. Die Voraussage einer mit zunehmender Frequenz stets quadratisch zunehmender Energiedichte erweist sich jedoch als falsch und führt zu einer unendlich großen totalen Energiedichte der Hohlraumstrahlung. Das wird auch als Ultraviolett-Katastrophe bezeichnet. Dies ist darauf zurückzuführen, dass im Modell von Rayleigh-Jeans über alle Frequenzen integriert unendlich viele Schwingungszustände möglich sind und auch angeregt werden.<sup>148</sup>

Die nachfolgende Abbildung zeigt auf anschauliche Weise die Diskrepanz zwischen dem Rayleigh-Jeans-Gesetz und den experimentellen Befunden der spektralen Energiedichten eines schwarzen Strahlers, der durch das Planck'sche Strahlungsgesetz zutreffend beschrieben wird. Bei hohen Frequenzen  $\nu$  kommt es zur Ultraviolett-Katastrophe:<sup>149</sup>

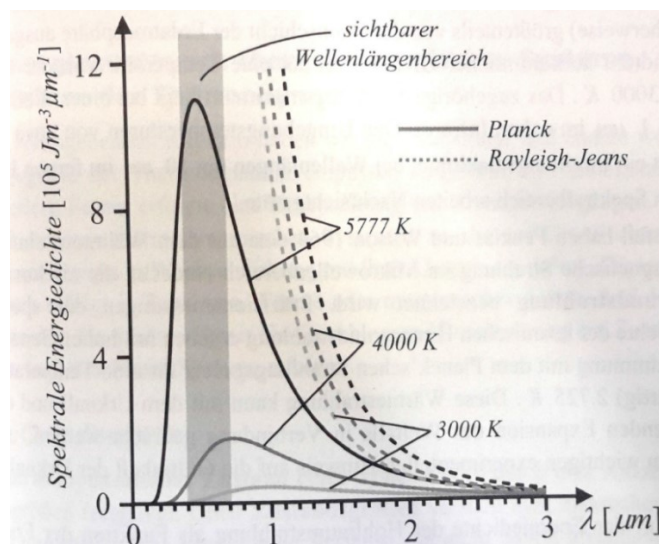


Abbildung 25 Ultraviolett-Katastrophe<sup>150</sup>

## Quantisierung und das Planck'sche Strahlungsgesetz

Für eine brauchbare Beschreibung der spektralen Energiedichten der Hohlraumstrahlung machte Planck folgende Annahme: Ein elektromagnetischer Oszillator der Frequenz  $\nu$  kann nur mit einer Mindestenergie  $h\nu$  oder mit ganzzahligen Vielfachen davon angeregt werden. Die von Planck dabei eingeführte Konstante  $h$  wird als Planck'sches Wirkungsquantum bezeichnet. Diese Beschränkung kann im Rahmen der klassischen Elektrodynamik nicht begründet werden.<sup>151</sup>

<sup>148</sup> Vgl. ebd. S. 212.

<sup>149</sup> Anm. des Verfassers: Hohe Frequenzen  $\nu$  entsprechen einer niedrigen Wellenlänge  $\lambda$ .

<sup>150</sup> Vgl. Wagner (2012), S. 213.

<sup>151</sup> Vgl. ebd. S. 212.

In Folge wird die Herleitung des Planck'schen Strahlungsgesetzes skizziert:<sup>152</sup>

- Die Energiedichte pro Frequenzintervall  $[\nu, \nu + d\nu]$  ist gegeben durch:

$$\rho(\nu, T) d\nu = \varepsilon(\nu, T) \cdot N(\nu) d\nu.$$

Wobei  $\varepsilon(\nu, T)$  der mittleren Anregungsenergie der Oszillatoren entspricht und  $N(\nu)$  der Zustandsdichte der Oszillatoren.

- Es wird angenommen, dass die Oszillatoren nur die Energien  $E_n = n \cdot h\nu$  annehmen.
- Die mittlere Anregungsenergie ist dann:  $\varepsilon(\nu, T) = \langle n(T) \rangle \cdot h\nu$ , wobei  $\langle n(T) \rangle$  die mittlere Besetzungszahl ist. Das heißt  $\langle n(T) \rangle = \sum n P_n$ , wobei  $P_n$  die Wahrscheinlichkeit ist, dass ein Oszillator die Energie  $E_n$  hat.
- Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Oszillator die Energie  $E_n$  hat ist Boltzmann verteilt, also

$$P_n = \frac{e^{-\frac{nh\nu}{k_B T}}}{\sum_{j=0}^{\infty} e^{-\frac{j h\nu}{k_B T}}}.$$

- Mit Hilfe der Summenformel der geometrischen Reihe kann dieser Ausdruck vereinfacht werden zu  $P_n = e^{-\frac{nh\nu}{k_B T}} (1 - e^{-\frac{h\nu}{k_B T}})$ .
- Die mittlere Besetzungszahl ergibt sich somit zu:

$$\langle n(T) \rangle = \sum n P_n = \left(1 - e^{-\frac{h\nu}{k_B T}}\right) \sum_{n=0}^{\infty} n e^{-\frac{nh\nu}{k_B T}} = \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1}.$$

- Jetzt fehlt noch die Zustandsdichte der Oszillatoren  $N(\nu)$ . Diese berechnet man aus der klassischen Elektrodynamik, indem man die Gleichung für elektromagnetische Wellen in einem Würfel betrachtet. Es ergibt sich:  $N(\nu) d\nu = 8\pi \frac{\nu^2}{c^3} d\nu$
- Jetzt ist es möglich, die Energiedichte als Produkt der Zustandsdichte mit der mittleren Anregungsenergie zu erhalten:

$$\rho(\nu, T) \cdot d\nu = \frac{8\pi}{c^3} \cdot h\nu^3 \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1} d\nu \quad (10)$$

Das Planck'sche Strahlungsgesetz (10) gibt die experimentellen Befunde der spektralen Energiedichte über den gesamten beobachteten Wellenlängenbereich präzise wieder. Somit ist es auch verständlich, warum dieses Gesetz von Planck auch als einer der Ausgangspunkte der Quantenphysik betrachtet wurde.

<sup>152</sup> Schranz W. Kapitel 3 Folie 14ff.

Der Verfasser will in diesem Unterkapitel zeigen, wie schwierig sich die Darstellung der Ultraviolett-Katastrophe und die damit verbundene Lösung präsentieren. Es werden einige abstrakte Modellvorstellungen verwendet, wie zum Beispiel die Beschreibung der möglichen Schwingungszustände durch harmonische Oszillatoren, oder die Annäherung eines schwarzen Körpers durch einen Hohlraum. Die mathematische Herleitung des Planck'schen Strahlungsgesetzes aufgrund der Planck'schen Quantenhypothese stellt sich als Herausforderung dar und ist somit aus Sicht des Verfassers als Einstieg in die Quantenphysik für die Sekundarstufe II ungeeignet.

## 4.2. Quantitative Beschreibung von Quantensystemen

Im Unterkapitel 3.5. wurde festgehalten, dass die Quantenphysik keine Aussagen über Einzeleignisse macht, sondern nur statistische Aussagen über relative Häufigkeiten von Ergebnissen bei oftmaliger Wiederholung des gleichen Experiments treffen kann.

Die Aufgabe der Quantenphysik besteht jetzt darin, für ein entsprechendes Quantensystem, für alle möglichen Zustände, die präpariert werden können und für jede Observable, die gemessen werden kann, die Wahrscheinlichkeit für die möglichen Messergebnisse anzugeben.<sup>153</sup>

Diese Aufgabe der Quantenphysik lässt sich allerdings nicht mehr alleine mit einem phänomenologischen Ansatz in Angriff nehmen. Es werden mathematische Hilfsmittel benötigt. Dieses Unterkapitel hat zum Ziel, einen kurzen Einblick in den mathematischen Formalismus der Quantenphysik zu geben. Dabei werden zwei unterschiedliche Quantensysteme betrachtet. Einerseits wird das Mach-Zehnder-Interferometer betrachtet, welches bereits im Unterkapitel 3.5 vorgestellt wurde. Mit Hilfe eines mathematischen Formalismus, der auf der Linearen Algebra basiert, sollen die beobachteten Detektionswahrscheinlichkeiten hergeleitet werden. Andererseits wird ein neuerliches Mal das Doppelspaltexperiment mit Quantenteilchen betrachtet, um die Bornsche Wahrscheinlichkeitsinterpretation zu begründen.

Der mathematische Formalismus, der für die Beschreibung von Quantensystemen verwendet wird, scheint dabei gewissermaßen vom Himmel zu fallen. Eine solche dogmatische Darstellung der Quantenphysik rechtfertigt sich insofern, als es keinen logisch strengen Weg von der klassischen Physik zur Quantenphysik gibt und letztere das Ergebnis einer Entwicklung von einigen Jahrzehnten zu Beginn des 20. Jahrhunderts ist. In diese ist viel Kreativität eingeflossen und sie stellt sich bei der Beschreibung unserer Lebenswelt als überaus erfolgreich dar.<sup>154</sup>

---

<sup>153</sup> Vgl. Embacher F. Expertengespräch.

<sup>154</sup> Vgl. ebd.

## Das Mach-Zehnder-Interferometer und der Hilbertraum

Als Ausgangspunkt soll die Prinzipskizze des Mach-Zehnder-Interferometers dienen. Diese ist in der nachstehenden Abbildung ersichtlich, wobei sie zusätzlich in die 3 unterschiedlichen Bereiche Präparierung, Zustand und Messung unterteilt ist:<sup>155</sup>

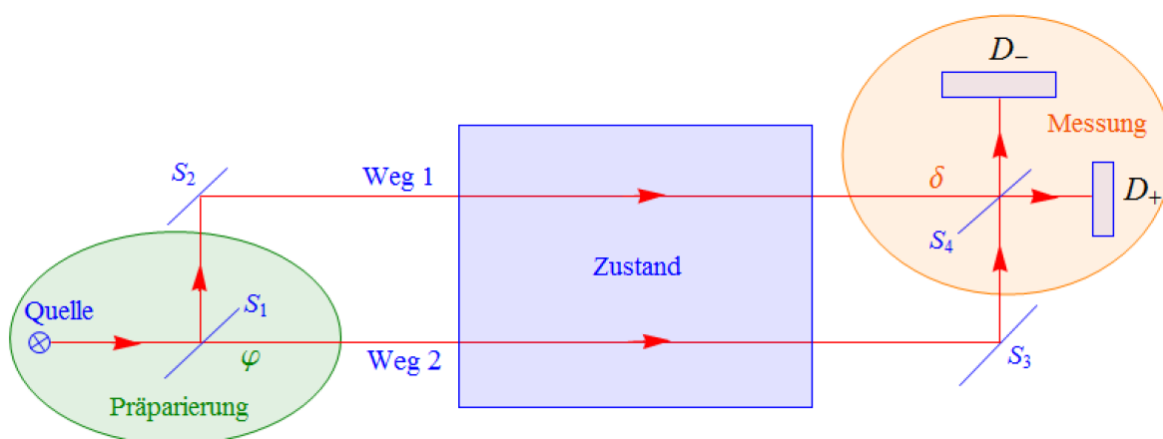


Abbildung 26 Mach-Zehnder-Interferometer – Präparierung, Zustand, Messung<sup>156</sup>

Im Kapitel 3.5 wurde beschrieben, dass sich bei einzelnen Photonen in der Versuchsanordnung folgendes beobachten lässt: Wird das Experiment mit gleichem Aufbau oft wiederholt, so ist die Zahl der Klicks der beiden Detektoren proportional zu den zuvor hergeleiteten Intensitäten  $I_{\pm}$  für Lichtwellen, und zwar umso genauer, je größer die Zahl der Versuchsdurchgänge ist. Es ergibt sich also folgende Wahrscheinlichkeit für das Klicken der Detektoren  $D_{+}, D_{-}$ :

$$W_{\pm} = \frac{1}{2}(1 \pm \cos(\varphi - \delta)) \quad (11)$$

Der mathematische Formalismus, der notwendig ist, um dieses Verhalten des Quantenphysikalischen Systems zu beschreiben wird jetzt an dieser Stelle skizziert: Es wird mit der Beschreibung von Zuständen begonnen. Ein Zustand eines Quantensystems wird durch ein normiertes Element eines Hilbertraums dargestellt. Beim Mach-Zehnder-Interferometer ist der geeignete Hilbertraum der  $\mathbb{C}^2$  zusammen mit dem komplexen Skalarprodukt.<sup>157</sup>

Wird im Mach-Zehnder-Interferometer ein Photon so präpariert, dass es den Weg 1 nehmen muss, so wird der Zustand durch folgenden Zustandsvektor beschrieben:

$$|\phi_1\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (12)$$

<sup>155</sup> Anm. des Verfassers: Der Vorteil einer demensprechenden Unterscheidung in der Quantentheorie wurde im Unterkapitel 3.3 argumentiert.

<sup>156</sup> Vgl. Embacher F. Expertengespräch.

<sup>157</sup> Vgl. ebd.

Wird das Photon andererseits so präpariert, dass es den Weg 2 nehmen muss, so wird es durch folgenden Zustandsvektor beschrieben:

$$|\phi_2\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

Es ist ersichtlich, dass diese beiden Vektoren  $|\psi_1\rangle, |\psi_2\rangle$  aufeinander normal stehen. In dieser Hinsicht bilden sie eine Orthonormalbasis des Hilbertraums. Jeder Zustandsvektor des Mach-Zehnder-Interferometers kann als Linearkombination dieser beiden Vektoren geschrieben werden. Durch diese Linearkombination wird bereits so etwas wie eine Überlagerung ausgedrückt. Es ist nun möglich, eine ganze Klasse von Zustandsvektoren anzugeben. Wird der Zustand des Photons so präpariert, dass beide Wege offen sind, und dass in Weg 2 ein Phasensprung  $\varphi$  bewirkt wird, so wird der Zustandsvektor folgendermaßen beschrieben:<sup>158</sup>

$$|\psi_\varphi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ e^{i\varphi} \end{pmatrix} \quad (14)$$

Es wird nun mit der Beschreibung von Observablen (Messgrößen) fortgesetzt. Eine Observable wird in der Quantentheorie durch einen linearen Operator auf dem Hilbertraum beschrieben. Im Beispiel des Mach-Zehnder-Interferometers sind das die linearen Operatoren  $\mathbb{C}^2 \rightarrow \mathbb{C}^2$  und diese können durch komplexe  $2 \times 2$  Matrizen dargestellt werden. Allerdings sind nur hermitesche Operatoren und entsprechende Matrizen zugelassen, welche nur reelle Eigenwerte besitzen. Gemäß den Regeln der Quantentheorie sind dann die möglichen Messwerte einer Observablen gerade die Eigenwerte der entsprechenden Matrix. Im Beispiel des Mach-Zehnder-Interferometers kann unter Berücksichtigung des Phasensprungs  $\delta$  eine ganze Klasse von möglichen Operatoren angeschrieben werden:<sup>159</sup>

$$\hat{Y}_\delta = \begin{pmatrix} 0 & e^{-i\delta} \\ e^{i\delta} & 0 \end{pmatrix} \quad (15)$$

Die Eigenwerte dieses Operators sind  $\lambda_1 = 1$  und  $\lambda_2 = -1$  und diese stehen repräsentativ dafür, welcher der Detektoren  $D_+, D_-$  »klickt«, und somit ein Photon detektiert. Die Eigenvektoren zu den entsprechenden Eigenwerten sind  $|\psi_\delta\rangle$  für den Eigenwert  $\lambda_1 = 1$  und  $|\psi_{\delta+\pi}\rangle$  für den Eigenwert  $\lambda_2 = -1$ .

In einem weiteren Schritt kann nun der Frage nachgegangen werden, wie die Quantentheorie Wahrscheinlichkeiten für mögliche Messausgänge vorhersagt. Für diese Berechnung sind die Eigenvektoren des jeweiligen Operators von Bedeutung.

---

<sup>158</sup> Vgl. ebd.

<sup>159</sup> Vgl. ebd.

Im Beispiel des Mach-Zehnder-Interferometers können die Wahrscheinlichkeiten dafür, welcher Detektor ein Photon detektiert, wie folgt berechnet werden:<sup>160</sup>

$$W_{|\psi\rangle}(\hat{Y}_\delta = \lambda_1) = |\langle\psi_\delta, \psi\rangle|^2 \quad (16)$$

$$W_{|\psi\rangle}(\hat{Y}_\delta = \lambda_2) = |\langle\psi_{\delta+\pi}, \psi\rangle|^2 \quad (17)$$

Dabei steht der Ausdruck  $W_{|\psi\rangle}(\hat{Y}_\delta = \lambda_1)$  für die Wahrscheinlichkeit, dass bei einem Zustand  $|\psi\rangle$  der Messwert  $\lambda_1$  bei der Observable  $\hat{Y}_\delta$  gemessen wurde.

Jetzt ist es möglich, die allgemeine Detektorwahrscheinlichkeit des Mach-Zehnder-Interferometers zu berechnen und die bekannte Formel (11) der Intensität herzuleiten.

$$|\langle\psi_\delta, \psi_\varphi\rangle|^2 = \left| \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (1, e^{-i\delta}) \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ e^{i\varphi} \end{pmatrix} \right|^2 = \left| \frac{1}{2} \cdot (1 + e^{i(\varphi-\delta)}) \right|^2 = \frac{1}{2} (1 + \cos(\varphi - \delta))$$

$$|\langle\psi_{\delta+\pi}, \psi_\varphi\rangle|^2 = \left| \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (1, e^{-i(\delta+\pi)}) \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ e^{i\varphi} \end{pmatrix} \right|^2 = \left| \frac{1}{2} \cdot (1 + e^{i(\varphi-\delta-\pi)}) \right|^2 = \frac{1}{2} (1 - \cos(\varphi - \delta))$$

An dieser Stelle sei folgendes angemerkt: Zustandsvektoren in der Quantentheorie werden generell auch als »Wellenfunktion« oder »Wahrscheinlichkeitswellen« bezeichnet. Es wird jedoch auffallen sein, dass in der quantentheoretischen Behandlung des Mach-Zehnder-Interferometers keine »Wellen« aufgetreten sind. Abgesehen von der Phaseninformation haben normierte Elemente des  $\mathbb{C}^2$  nicht viel von einer Welle an sich. Der Wellencharakter von Zustandsvektoren zeigt sich deutlicher, sobald der Ort des Teilchens mit einbezogen wird. Das wird jetzt auch in Folge in Angriff genommen.<sup>161</sup>

## Wahrscheinlichkeitsinterpretation und Wellenfunktion

Nun wollen wir auch den Ort von Quantenteilchen in Betrachtung ziehen und blicken noch ein weiteres Mal auf das Doppelspaltexperiment mit Quantenteilchen:

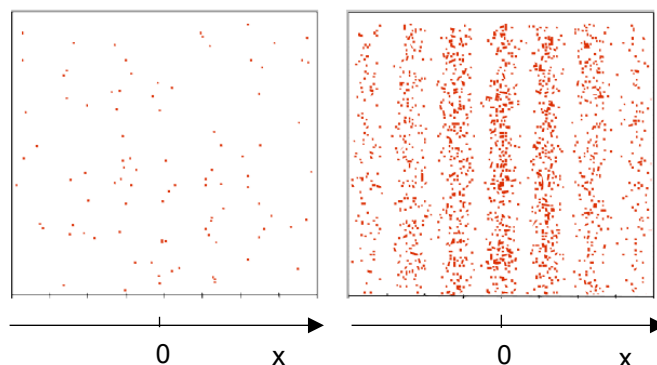


Abbildung 27 Wahrscheinlichkeitsinterpretation am Doppelspalt<sup>162</sup>

<sup>160</sup> Vgl. ebd.

<sup>161</sup> Vgl. ebd.

<sup>162</sup> Vgl. Müller R. und Wieser H. a) S. 35. [Zugriff am 16.06.2016]

Die obige Abbildung zeigt, wie sich das Interferenzmuster des Doppelspalts mit einzelnen Quantenobjekten nach und nach aufbaut. Jeder neue Aufschlagsort eines Quantenteilchens ist vom Zufall abhängig, aber für eine große Menge kann man eine Aussage treffen, in welchen Bereichen viele Aufschläge detektiert werden, und wo wenige. Zusätzlich zeigt sich bei Betrachtung des Interferenzmusters eine ausgezeichnete Richtung, die in der Abbildung als x-Achse markiert worden ist.

Es ist nun mathematisch möglich, die Intensitätsverteilung der Quantenobjekte durch eine Verteilungsfunktion  $P(x)$  zu charakterisieren. Diese Funktion betrachtet nur die Aufschlagswahrscheinlichkeit der Quantenobjekte entlang der entsprechenden x-Achse. Diese Verteilungsfunktion  $P(x)$  wird quantenphysikalisch als Wahrscheinlichkeitsdichte interpretiert.  $P(x) \cdot \Delta x$  gibt die Wahrscheinlichkeit an, ein Quantenobjekt im Intervall  $\Delta x$  um den Ort  $x$  herum zu finden.<sup>163</sup>  $P(x)$  hat an Stellen mit hoher Nachweiswahrscheinlichkeit einen großen Wert, an Stellen mit niedriger Wahrscheinlichkeit einen kleinen Wert und an Stellen, wo niemals ein Quantenteilchen zu finden ist den Wert Null.<sup>164</sup>

Mit der Wahrscheinlichkeitsdichte  $P(x)$  lassen sich Quantenobjekte mathematisch beschreiben. Wenn  $P(x)$  bekannt ist, dann kann man zum Beispiel die Verteilung der Quantenobjekte auf dem Schirm vorhersagen. Das Ziel quantenmechanischer Berechnungen ist es, die Wahrscheinlichkeitsfunktion  $P(x)$  in der jeweils interessierenden physikalischen Situation zu ermitteln.

Es hat sich als vorteilhaft herausgestellt, nicht mit  $P(x)$  selbst zu arbeiten, sondern mit einer Funktion  $\psi(x)$ , die man »Wellenfunktion« nennt. Diese Wellenfunktion ist einem Ensemble von identisch präparierten Quantenobjekten zugeordnet. Für die Bestimmung von  $\psi(x)$  kann man Gleichungen angeben, wie zum Beispiel die »Schrödinger Gleichung«. Der Zusammenhang zwischen der Wahrscheinlichkeitsfunktion  $P(x)$  und der Wellenfunktion  $\psi(x)$  ist ein zentrales Element der Quantenphysik und wurde durch Max Born in seiner Wahrscheinlichkeitsinterpretation begründet.<sup>165</sup>

*„Quantenobjekte werden durch eine Wellenfunktion  $\psi(x)$  beschrieben. Die Wellenfunktion bestimmt die Wahrscheinlichkeit, ein Quantenobjekt im Intervall  $\Delta x$  um den Ort  $x$  nachzuweisen:  $P(x) \cdot \Delta x = |\psi(x)|^2 \cdot \Delta x$ .“<sup>166</sup>*

---

<sup>163</sup> Anm. des Verfassers: Dieser Zusammenhang gilt, wenn  $\Delta x$  entsprechend klein gewählt wird.

<sup>164</sup> Vgl. Müller R. und Wieser H. a) S. 49. [Zugriff am 16.06.2016]

<sup>165</sup> Vgl. ebd. S. 50. [Zugriff am 16.06.2016]

<sup>166</sup> Ebd. S. 50. [Zugriff am 16.06.2016]



Es sei angemerkt, dass die Bestimmung der Wellenfunktion  $\psi$  mit Hilfe der Schrödinger-Gleichung mathematisch anspruchsvoll ist und im Schulunterricht nur in Spezialfällen durchgeführt werden könnte. Die Schrödinger-Gleichung ist eine lineare Differentialgleichung 2. Ordnung. Um die Wellenfunktion  $\psi$  zu erhalten, muss diese Gleichung gelöst werden.

Die Schrödinger-Gleichung wird für die Bestimmung von stationären Zuständen verwendet. Diese tauschen wegen ihrer Zeitunabhängigkeit keine Energie mit ihrer Umgebung aus und besitzen daher die Eigenschaft »Gesamtenergie«. Bei der Schrödinger-Gleichung handelt es sich daher um eine Eigenwertgleichung der Gesamtenergie, die sich wie folgt darstellt:<sup>167</sup>

$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} + V(x) \right] \psi(x) = E_{ges} \cdot \psi(x) \quad (18)$$

Der Ausdruck in der eckigen Klammer ist der Operator für die Gesamtenergie, der auf die Wellenfunktion  $\psi$  angewandt wird. Dieser besteht aus dem Operator der potentiellen Energie  $V(x)$  und dem Operator der kinetischen Energie  $-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2}$ . Die Zahl  $E_{ges}$ , die den Wert der Gesamtenergie angibt, nennt man den Eigenwert.

### 4.3. Schrödingers Katzenparadoxon – Dekohärenztheorie

Das Katzenparadoxon von Schrödinger hat eine große Popularität erlangt. Das ist auch eines der Ergebnisse von den Schülerinterviews, die im Unterkapitel 2.3 durchgeführt worden sind. Es ist daher auch angebracht, dass dieses berühmte Gedankenexperiment im Rahmen dieser Arbeit behandelt wird. Es stellt sich dabei zunächst die Frage, was eigentlich das Paradoxe an diesem Katzenbeispiel ist. Um das genauer betrachten zu können, beschäftigt sich dieser Abschnitt mit dem Begriff der Verschränkung, die im Kapitel 2 als einer der Wesenszüge der Quantenphysik vorgestellt wurde. In Verbindung damit wird auch ein Einblick in die Dekohärenztheorie gewagt, die einen möglichen Ansatz darstellt, um das Paradoxon aufzulösen. Zunächst wird das Katzenparadoxon vorgestellt:

*„Eine Katze wird in eine Stahlkammer gesperrt, zusammen mit folgender Höllenmaschine...; in einem Geigerschen Zählrohr befindet sich eine winzige Menge radioaktiver Substanz, so wenig, dass im Lauf einer Stunde vielleicht eines von den Atomen zerfällt, ebenso wahrscheinlich aber auch keines; geschieht es, so spricht das Zählrohr an und betätigt über ein Relais ein Hämmerchen, das ein Kölbchen mit Blausäure zertrümmert. Hat man dieses System eine Stunde lang sich selbst überlassen, so wird man sagen, dass die Katze noch lebt, wenn inzwischen kein Atom zerfallen ist. Der erste Atomzerfall würde sie vergiften haben.“<sup>168</sup>*

<sup>167</sup> Vgl. ebd. S. 94. [Zugriff am 16.06.2016]

<sup>168</sup> Küblbeck und Müller (2003), S. 85.

Die Fragestellung ist nun: In welchem Zustand befindet sich die Katze vor dem Öffnen der Kiste? Und da kommt es zur kontroversen Situation: Die Quantentheorie sagt zu diesem Problem das folgende: Die Atome der radioaktiven Substanz können durch eine Überlagerung der Zustände »zerfallen« und »nicht zerfallen« beschrieben werden. Dieser Zustand ist verschränkt mit dem des Zählrohrs, der wiederum über den Zustand des Kölbchens mit dem Zustand der Katze. Solange an keinem der Bestandteile dieser Kette eine Messung vorgenommen wird, bleiben alle Glieder in einem Überlagerungszustand. Aber unsere Erfahrung mit klassischen Objekten sagt uns, dass es absurd ist, anzunehmen, dass die Katze in einem Überlagerungszustand ist.<sup>169</sup>

Das experimentell zugängliche Merkmal eines Überlagerungszustands sind Interferenzerscheinungen. Zur Auflösung des Katzenparadoxons müsste man also fragen, wieso man keine Interferenzerscheinungen zwischen lebendiger und toter Katze beobachtet.<sup>170</sup>

Die Dekohärenztheorie geht von folgender Beobachtung aus: Je größer ein Objekt ist, umso eher und umso wahrscheinlicher wechselwirkt es mit anderen Objekten der Umgebung. Man kann zeigen, dass diese Wechselwirkung bei einem makroskopischen Objekt innerhalb von kürzester Zeit aus dem Überlagerungszustand einen Zustand macht, in dem Interferenzerscheinungen nicht mehr nachgewiesen werden können. Das bedeutet, dass es auch vor dem Öffnen der Kiste keine Interferenz zwischen »toter Katze« und »lebendiger Katze« gibt und das Paradoxon gelöst ist.<sup>171</sup>

Um diese Auflösung des Paradoxons mit Hilfe der Dekohärenztheorie besser zu verstehen, betrachten wir die Wellenfunktion  $\psi$  für ein Atom im Doppelspaltexperiment. Dabei ist es günstig, die nachfolgende Abbildung zu betrachten:

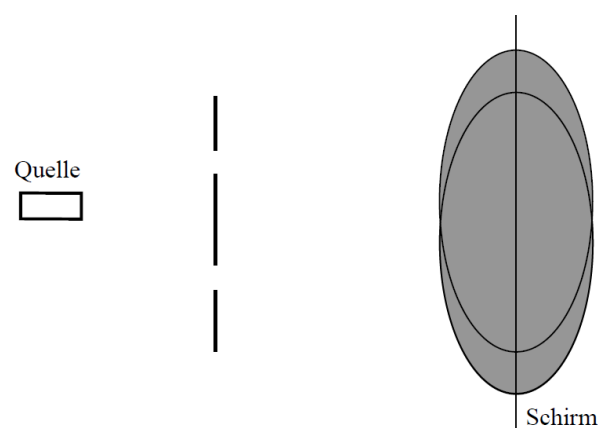


Abbildung 28 Wellenfunktion  $\psi$  für ein Atom im Doppelspaltexperiment<sup>172</sup>

<sup>169</sup> Vgl. ebd. S. 86.

<sup>170</sup> Vgl. ebd. S. 87.

<sup>171</sup> Vgl. ebd. S. 87.

<sup>172</sup> Vgl. ebd. S. 66.

Bei der Abbildung ist anzumerken, dass die dunklen Ellipsen auf qualitative Weise die Wellenfunktion  $\psi$  andeuten. Die dunkle Fläche entspricht dabei Bereichen, in welchen die Wahrscheinlichkeit, ein Teilchen anzutreffen, »deutlich von Null« verschieden ist. Tatsächlich handelt es sich bei der grafischen Darstellung nur um eine Veranschaulichung der mathematischen Beschreibung und nicht um die tatsächlichen Verteilungen.<sup>173</sup>

Die Wellenfunktion  $\psi$  für ein Atom im Doppelspaltexperiment lässt sich wie folgt anschreiben:

$$\psi^{atom} = \psi_{li}^{atom}(x) + \psi_{re}^{atom}(x) \quad (19)$$

Die Beschreibung dieses Zustands wurde im Rahmen dieser Arbeit noch nicht genau angesprochen und fällt an dieser Stelle somit gewissermaßen vom Himmel. Als Analogie sei an dieser Stelle zumindest auf das Unterkapitel 4.2 verwiesen, wo beim Mach-Zehnder-Interferometer ein Zustand als Linearkombination von zwei »Basiszuständen« angeschrieben wurde. Dadurch wird gewissermaßen so etwas wie eine Überlagerung ausgedrückt.

Beim Ausmultiplizieren des Betragsquadrats der Wellenfunktion  $\psi$ , um auf die Wahrscheinlichkeitsverteilung zu gelangen, erhält man einen Interferenzterm, der das folgende Produkt enthält:

$$\psi_{li}^{atom*}(x) \cdot \psi_{re}^{atom}(x) \quad (20)$$

Dieser Term und die Interferenzerscheinung, die er beschreibt, sind das Anzeichen dafür, dass sich das zugehörige Quantenobjekt in einem Überlagerungszustand befindet. Übertragen auf die Katze wären das die beiden Möglichkeiten »tot« und »lebendig«. Warum werden jetzt bei Atomen Interferenzerscheinungen beobachtet und bei Katzen jedoch nicht? Die Dekohärenztheorie versucht die Frage dadurch zu beantworten, dass die natürliche Umgebung der Katze in die Beschreibung mit einbezogen wird. Dabei spielt die Verschränkung von Quantenteilchen eine wesentliche Rolle. Zwei Objekte werden stets miteinander verschränkt, wenn sie miteinander wechselwirken.<sup>174</sup>

Um den Einfluss der Verschränkung auf die Interferenzerscheinungen zu klären, wird erneut das Doppelspaltexperiment mit einzelnen Atomen betrachtet. Zusätzlich wird diesmal auch ein Streuobjekt betrachtet, das mit den Atomen wechselwirkt. Bei der Durchführung des Experiments können zwei Fälle unterschieden werden. Dazu kann die nachfolgende Abbildung betrachtet werden:

---

<sup>173</sup> Vgl. ebd. S. 63.

<sup>174</sup> Vgl. ebd. S. 87.

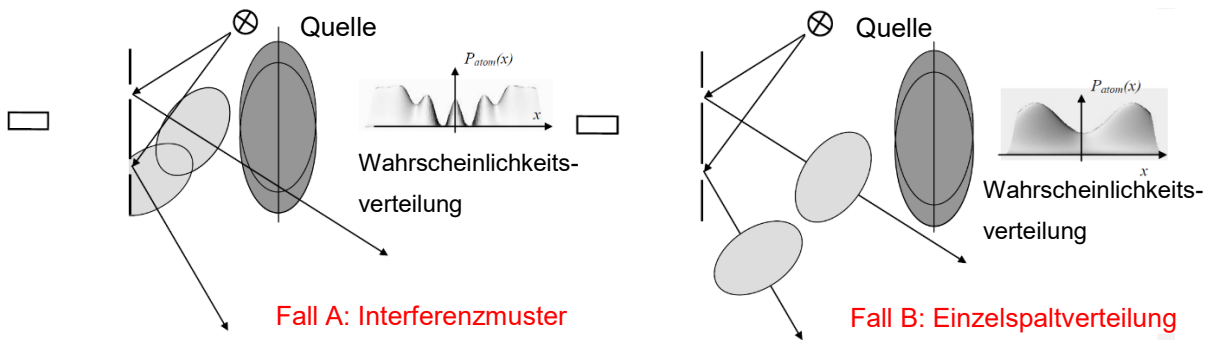


Abbildung 29 Interferenzerscheinungen bei verschränkten Quantenobjekten<sup>175</sup>

Bei der Abbildung sind die beiden unterschiedlichen Fälle gegenübergestellt. In beiden Fällen ist das Doppelspaltexperiment dargestellt, das bereits zuvor in Abbildung 28 beschrieben worden ist. Zusätzlich wird ein Streuobjekt von der Quelle ausgesandt und dessen Wellenfunktion  $\psi^{streu}$  wird durch die hellen Ellipsenflächen angedeutet.

Es kann nun experimentell folgendes beobachtet werden: Damit ein Interferenzmuster am Schirm zu erkennen ist, müssen zum Zeitpunkt der Detektion sowohl die Teilwellenpakete des Atoms, als auch die des Streuobjekts überlappen.<sup>176</sup>

Für die Beschreibung der Wellenfunktion des Gesamtsystems  $\psi^{atom+streu}$  ist nun sowohl das Atom, als auch das Streuobjekt zu betrachten. Zunächst wird die Situation betrachtet, dass das Streuobjekt bei geschlossenem rechten Spalt von einem Atom am linken Spalt gestreut wurde. Die Wellenfunktion »links«  $\psi_{li}$  wird durch Multiplizieren der Einzelfunktionen gebildet:<sup>177</sup>

$$\psi_{li} = \psi_{li}^{atom}(x_{atom}) \cdot \psi_{li}^{streu}(x_{streu}) \quad (21)$$

Die Funktion des Gesamtsystems  $\psi^{atom+streu}$  wird als Überlagerungszustand von  $\psi_{li}, \psi_{re}$  dargestellt:

$$\psi^{atom+streu} = \psi_{li}^{atom}(x_{atom}) \cdot \psi_{li}^{streu}(x_{streu}) + \psi_{re}^{atom}(x_{atom}) \cdot \psi_{re}^{streu}(x_{streu}) \quad (22)$$

Die Funktion des Gesamtsystems ist nicht mehr als ein Produkt  $\psi^{atom} \cdot \psi^{streu}$  darstellbar. Atom und gestreutes Objekt bilden eine Einheit, man sagt sie sind verschränkt.<sup>178</sup>

Beim Ausmultiplizieren des Betragsquadrats treten im Interferenzterm für Atom und Streuobjekt die verschiedenen Möglichkeiten als Produkte auf:

$$\psi_{li}^{atom*}(x_{atom}) \cdot \psi_{re}^{atom}(x_{atom}) \cdot \psi_{li}^{streu*}(x_{streu}) \cdot \psi_{re}^{streu}(x_{streu}) \quad (23)$$

<sup>175</sup> Vgl. ebd. S. 69f. Anm. des Verfassers: Die Abbildung wurde vom Verfasser verändert.

<sup>176</sup> Vgl. ebd. S. 70.

<sup>177</sup> Vgl. ebd. S. 69.

<sup>178</sup> Vgl. ebd. S. 69.

Der Interferenzterm verschwindet bereits, wenn eines der Produkte null wird. Es wird nun ersichtlich, warum in Abbildung das Interferenzmuster auf dem Schirm verschwindet, sobald die Teilwellenpakete des Streuobjekts nicht mehr überlappen. In diesem Fall wäre nämlich das Produkt  $\psi_{li}^{streu*}(x_{streu}) \cdot \psi_{re}^{streu}(x_{streu}) = 0$ .<sup>179</sup>

Wenn wir nun die Situation des Doppelspaltexperiments mit Streuobjekt auf das Katzenparadoxon anwenden und somit die Beschreibung auf die vielen Wechselwirkungsmöglichkeiten der Umgebung erweitern, so setzt sich dieses Schema fort und ein möglicher Interferenzterm lautet:

$$\psi_{tot}^{Katze*}(x) \cdot \psi_{lebt}^{Katze}(x) \cdot \psi_{tot}^{Streu1*}(x_1) \cdot \psi_{lebt}^{Streu1}(x_1) \dots \psi_{tot}^{Streun*}(x_n) \cdot \psi_{lebt}^{Streun}(x_n) \quad (24)$$

Der zentrale Punkt der Dekohärenz ist nun: Wenn von den vielen Produkten nur ein einziges Null ist, dann ist der ganze Interferenzterm Null und Interferenzerscheinungen treten nicht mehr auf. Diese Unterdrückung der Interferenz durch die Umgebungsfreiheitsgrade nennt man Dekohärenz. Sie ist ein Lösungsansatz für das Katzenparadoxon.<sup>180</sup>

#### 4.4. Zusammenfassung

In diesem Kapitel 4 wurde anhand von drei unterschiedlichen Beispielen durch den Verfasser argumentiert, dass ein rein phänomenologischer Zugang zu Vorgängen der Quantenphysik nicht immer möglich ist. Um quantitative Aussagen über das Verhalten von Quantensystemen zu machen, ist es notwendig einen mathematischen Formalismus zu verwenden. Dabei werden Zustände als Wellenfunktionen und Vektoren in einem Hilbertraum beschrieben. Darüber hinaus wurde ein kleiner Einblick in die Dekohärenztheorie mit Hilfe des Katzenparadoxons von Schrödinger geliefert. Auch hierbei hat es sich gezeigt, dass die Beschreibung der Zustände durch komplexe Wellenfunktionen das Verständnis für die Lösung des Paradoxons erleichtert, indem die entsprechenden Interferenzterme betrachtet werden können.

Der im Kapitel 3 beschriebene phänomenologische Zugang zu bestimmten zentralen Begriffen der Quantentheorie kann nur als Verständnisbasis dienen. Über diese Basis hinaus gibt es allerdings noch viele faszinierende Phänomene der Quantenphysik, die man nur mit einem entsprechenden mathematischen Formalismus umfassend verstehen kann.

---

<sup>179</sup> Vgl. ebd. S. 70.

<sup>180</sup> Vgl. ebd. S. 88.

## 5. Schluss

Zum Abschluss dieser Diplomarbeit soll noch einmal die forschungsleitende Frage ins Zentrum gestellt werden:

**Wie kann Schülerinnen und Schülern der Sekundarstufe II ein Zugang zu den zentralen Begriffen der Quantenphysik ermöglicht werden, der zum einen konzeptuell korrekt ist und zum anderen mit möglichst wenig mathematischem Formalismus auskommt?**

Im Rahmen dieser Arbeit wurde diese Frage umfassend behandelt und es kann an dieser Stelle auch eine Antwort gegeben werden. Für diese Beantwortung wird das Ergebnis der einzelnen Kapitel dieser Arbeit noch einmal kurz zusammengefasst, um alle relevanten Informationen auf einen Blick parat zu haben:

Im Kapitel 2 wurde geklärt, dass die Quantenphysik eine eindeutige Berechtigung hat, in der österreichischen Sekundarstufe II unterrichtet zu werden. Es besteht eine große Auswirkung dieser modernen Theorie auf Wissenschaft und Gesellschaft und darüber hinaus besteht bei den Schülerinnen und Schülern der Sekundarstufe II auch ein Interesse, diese zu lernen; in gewisser Weise kann man sogar von einer Faszination sprechen. Das wird auch durch die derzeit bestehenden Lehrpläne der Sekundarstufe II bestätigt. Zusätzlich wurden in diesem Kapitel Wesenszüge der Quantenphysik aufgelistet.

Auf diesen Wesenszügen wurde im Kapitel 3 aufgebaut. Einzelne Wesenszüge wurden detaillierter dargestellt, andere wurden miteinander verknüpft. Teilweise wurden auch zusätzliche Grundbegriffe der Quantenphysik definiert und abgegrenzt. Alle diese zentralen Begriffe, die aus Sicht des Verfassers mit einem phänomenologischen Ansatz konzeptuell korrekt vermittelt werden können, wurden in diesem Kapitel nacheinander abgearbeitet. Im Zentrum jedes Unterkapitels standen unterschiedliche Experimente, mit denen die zentralen Aspekte qualitativ und anschaulich vermittelt werden können. An den Stellen, wo keine realen Experimente im Schulunterricht möglich sind, wurde auf Computersimulationen verwiesen.

Es hat sich aus Sicht des Verfassers gezeigt, dass bei fast allen zentralen Aspekten ein phänomenologischer Zugang für die Schülerinnen und Schüler der Sekundarstufe II möglich ist, der konzeptuell korrekt ist und somit eine Verständnisbasis für die Quantenphysik darstellen kann. In dieser Hinsicht wurde die forschungsleitende Frage beantwortet und der Inhalt des Kapitels 3 kann als Unterrichtskonzept angewandt werden, um diese zentralen Begriffe zu vermitteln.

Diese zentralen Begriffe können allerdings nur als Basis für das Verständnis der Quantenphysik dienen. Dass es über diese Basis hinaus noch ein weites faszinierendes Feld an Phänomenen der Quantenphysik gibt, wurde durch den Verfasser in Kapitel 4 argumentiert. Gerade die quantitative Aufgabe der Quantenmechanik, die darin besteht, für alle möglichen Zustände, die präpariert werden können und für jede Observable, die gemessen werden kann, die Wahrscheinlichkeit für jeden möglichen Messausgang anzugeben, bedarf eines gewissen mathematischen Formalismus, der die Möglichkeiten der Sekundarstufe II übersteigt.

## Reflexion

Abschließend soll das Ergebnis dieser Diplomarbeit reflektiert werden. Dabei erfolgt ein Vergleich des Resultats mit der Studie des »Münchener Unterrichtskonzepts« zur Quantenmechanik, welche zu Beginn von Kapitel 3 präsentiert worden ist. Zusätzlich dazu wird das Ergebnis eines Interviews mit einer Physiklehrerin des »borg3« herangezogen.<sup>181</sup>

Der Vergleich zeigt, dass es im Wesentlichen große Übereinstimmungen gibt. Die angeführte Studie zeigt, dass der phänomenologische Zugang zu zentralen Aspekten der Quantenphysik in der Sekundarstufe II möglich und sinnvoll ist. Auch das Interview mit der Lehrerin des »borg3« verstärkt dieses Bild und die Quantenphysik kann als faszinierender Teil des Lehrplans betrachtet werden.

Der Vergleich ergab allerdings nicht nur Übereinstimmungen. Sowohl die Lehrerin des »borg3« als auch das »Münchener Unterrichtskonzepts« argumentieren, dass das Katzenparadoxon von Schrödinger mit einem phänomenologischen Zugang verständlich gemacht werden kann. Aus Sicht des Verfassers wird dieses Paradoxon allerdings als zu schwierig betrachtet, um es konzeptuell richtig zu vermitteln. Die konzeptuell richtige Lösung des Paradoxons gelingt gut mit der Dekohärenztheorie, deren klares Verständnis auch den Begriff der Verschränkung benötigt. Ohne den entsprechenden mathematischen Formalismus hat man aus Sicht des Verfassers Schwierigkeiten bei der Vermittlung.

Ein Indiz für diese Schwierigkeit liefern auch die Schülerinterviews die im Rahmen der Arbeit durchgeführt wurden. Der Begriff vom Katzenparadoxon war allen bekannt, aber deren Interpretation war in allen Fällen konzeptuell falsch. Aber vielleicht ist es nicht immer notwendig, konzeptuell richtige Konzepte zu vermitteln, wenn man eine Faszination für ein Themengebiet herstellen kann. Schlussendlich gilt der Grundsatz:

*"Lehren heißt, ein Feuer entfachen, und nicht, einen leeren Eimer füllen."<sup>182</sup>*

---

<sup>181</sup> Anm. des Verfassers: Das Interview ist im Anhang angeführt.

<sup>182</sup> Aussage des griechischen Philosophen Heraklit von Ephesos.

## 6. Literaturverzeichnis

### Bücher

- Chown M., *Warum Gott doch würfelt*, 3.Aufl., Deutscher Taschenbuch Verlag, München 2013.
- Meyer H., *Was ist guter Unterricht?*, 8.Aufl., Cornelsen Verlag Scriptor GmbH & Co. KG, Berlin 2011.
- Müller R., *Quantenphysik in der Schule*, In der Reihe: Studien zum Physik- und Chemielernen, Bd. 26, Logos-Verlag, Berlin 2003.
- Küblbeck J. und Müller R., *Die Wesenszüge der Quantenphysik, Modelle, Bilder und Experimente*, 2., verb. Aufl., Aulis-Verlag Deubner, Köln 2003.
- Lüth H., *Quantenphysik in der Nanowelt, Schrödingers Katze bei den Zwergen*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2009.
- Susskind L. und Friedman A., *Quantum Mechanics, The Theoretical Minimum*, Penguin Books, Great Britain 2014.
- Wagner P., Reischl G., Steiner G., *Einführung in die Physik. 2.*, neu bearbeitete Aufl., Facultas Verlags- und Buchhandels AG, Wien 2012.

### Zeitschriften

- Müller R. und Wiesner H. (2002), *Teaching quantum mechanics on an introductory level*, in: *Physics Education – American Journal of Physics* Heft 70 (2002), S. 200-209.
- Pospiech G. (2016), *Quantenphysik intuitiv – das GHZ-Spiel*, in: *Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule*, Heft 2/65 vom März/2016, S. 33-36.

### Sammelwerke

- Olechowski R., *Schlußfolgerungen für eine Reform der Schulen der Vierzehn bis Neunzehnjährigen unter dem Aspekt einer „humanen Schule“*, in: Persy E. und Tesar E. (Hrsg.), *Die Zukunft der Schulen der Vierzehn- bis Neunzehnjährigen*, Peter Lang, Frankfurt am Main 1997, S. 361–376.

### Gesetzestexte

- BGBl. Nr. 88/1985 zuletzt geändert durch BGBl. II Nr. 113/2016
- BGBl. II Nr. 185/2012, zuletzt geändert durch BGBl. II Nr. 174/2015
- BGBl. II Nr. 300/2011.
- BGBl. II Nr. 327/2004.



## Onlinequellen

- Homepage Universität Wien. Experimentelle Grundausbildung und Hochschuldidaktik - Physikalische Praktika für Anfänger. PW7 Brechung. Anleitungstext. Online im Internet: <http://www.univie.ac.at/anfpra/neu1/pw/pw7.php> [Zugriff am: 26.05.2016]
- Homepage des Bundesministeriums für Bildung und Frauen. Das österreichische Bildungssystem. Online im Internet: [https://www.bmbf.gv.at/schulen/bw/ueberblick/bildungswege2015\\_grafik.pdf?55ph38](https://www.bmbf.gv.at/schulen/bw/ueberblick/bildungswege2015_grafik.pdf?55ph38) [Zugriff am 17.05.2016]
- Homepage Swiss Federal Institute of Technology in Zurich. Physik IV – Einführung in die Quantenmechanik. Online im Internet: <http://qudev.phys.ethz.ch/content/science/IV/PhysikIVch8.html> [Zugriff am 27.05.2016]
- Müller R. und Wieser H. a), *Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik*, Online im Internet: <http://homepages.physik.uni-muenchen.de/~milq/download.html> [Zugriff am: 26.05.2016]
- Müller R. und Wieser H. b), *Photonen im Mach-Zehnder-Interferometer – ein Zugang zur Deutung der Quantenphysik*, Online im Internet: <https://www.tu-braunschweig.de/Medien-DB/ifdn-physik/interferometer.pdf> [Zugriff am 10.06.2016]
- Spektrum.de, Lexikon der Physik, *Laplacescher Dämon*, Online im Internet: <http://www.spektrum.de/lexikon/physik/laplacescher-daemon/8775> [Zugriff am: 17.05.2016]

## Expertengespräche

- Embacher F., Thema: *Erste Schritte im Formalismus der Quantentheorie anhand des Mach-Zehnder-Interferometers*, Wien, fortlaufende Gespräche im Mai, Juni 2016.

## Vorträge, Skripten

- Rupp R., *Prinzipien der Modernen Physik – Spezielle Relativitätstheorie und Quantentheorie für Lehramtskandidaten*, Skript, Stand: 10.Juli 2013, Fakultät für Physik Universität Wien, Wien 2013.
- Schranz W., *Physik der Materie I*, Vorlesungsfolien vom Sommersemester 2015.

## 7. Anhang

### 7.1. Interviews

#### Interview 1: Andrea Kovarik – Physiklehrerin des borg3

1 **Christian Desbalmes:** Ok. das ist das erste Expertengespräch ähm in Bezug auf die Quan-  
2 tenphysik und die Schule, und meine erste Frage wäre eben, was sind aus Ihrer Sicht drei  
3 zentrale Begriffe der Quantenphysik.

4 **Andrea Kovarik:** ähm zuerst einmal der Doppelspalt, Versuch (1) bis zu den Elektronen, Ato-  
5 men und so weiter, das zweite ist die (1) Unschärferelation u n d (1) als drittes, ja das über-  
6 schneidet sich jetzt, Schrödingers Katze. (1) also das, ich finde (das sind) auch die Begriffe,  
7 die die Schüler kennen (1) teilweise.

8 **C:** Ok. (1) alles klar und wenn man jetzt diese drei Begriffe einzeln betrachtet, ähm (1) bei  
9 welchen von denen ist es aus Ihrer Sicht möglich, dass man die zentralen Begriffe zugänglich  
10 macht, dabei aber möglichst wenig mathematischen Formalismus verwendet, aber dass man  
11 die Begriffe trotzdem noch (1) korrekt vermitteln kann.

12 **A:** Ja. das würd ich bei allen drei sagen dass man eigentlich nicht Mathematik, äh also dass  
13 man kaum eine Mathematik braucht also in allen (2) ähm wie heißt das (1) Typen die wir haben  
14 also eben realistischen, (1) da könnte man mehr Mathematik machen aber auch im musischen  
15 Zweig mach ichs genauso. (1) also da brauch ich keine Mathematik außer  $\Delta$  (Delta oder ...)

16 **C:** Ok. (2) und was wär dann eine gute Zugangsmöglichkeit. bei diesen einzelnen Begriffen  
17 vielleicht mit Experimenten, oder mit speziellen Methoden wie man das dann auch in der Se-  
18 kundarstufe II unterrichten kann,

19 **A:** Ja ich beginn mit d e r äh nach der Optik, also nicht nach der Optik, schon während der  
20 Optik brauch ich, wenn ich den Doppelspalt von Thomas Young mach, geh ich dann gleich  
21 weiter auf die (..) dass das Licht ja doch ein Teilchen ist, also wieder den Photoeffekt und dann  
22 auch gleich weiter, dass auch Elektronen Welle-Teilchen Charakter haben u n d (1) (....) also  
23 das bespreche ich gleich in einem, gleich beim (1) bei der Optik mach ich das eigentlich.

24 **C:** Kann man das beim Doppelspalt mit einer Computersimulation machen, oder ist das dann  
25 eher mit einem Gedankenexperiment.

26 **A:** Naja es gibt, es gibt ein ganz nettes Video find ich auf YouTube, das ist äh Doktor Quantum  
27 (2) also zuerst erklär ichs einmal, ich mein wir sehen natürlich (1) wir können schon ein (....)  
28 kann man ja schon sehen, aber sonst mach ich das mit dem Video dann auch noch einmal.  
29 wie hieß das (1) Doktor Quantum. sehenswert und einprägsam.

30 **C:** Sehr schön. ok und wenn wir den zweiten Begriff hernehmen, (1) also d i e  $\Delta$  Unschärfere-  
31 lation.  $\Delta$

32 **A:** Die Unschärferelation ähm (1) naja Ortsunschärfe das geht ja eh gleich über, das andere  
33 ist dann (2) mit der Zeit also  $\Delta E$  also (1) mit der Energie und mit der Zeit, äh da ist es, Tunnel-  
34 effekt braucht man ja auch schon beim radioaktiven Zerfall, also das sind ja auch schon Sa-  
35 chen, die man eigentlich eh braucht. ohne dem würde man das eh schon unvollständig erklä-  
36 ren. (1) und den Tunneleffekt, ja (2) das kann man halt nur erklären.  $\downarrow$ also $\downarrow$

37 **C:** Ok das heißt man, man stellt das quasi konzeptuell vor mit einem  $\downarrow$ Gedankenexperiment  
38 und geht dann auf die Energie-Zeit Unschärfe ein. und die Orts-Impuls,  $\downarrow$

39 **A:** Ja (1) ja, ja, ja. und die Energie-Zeit Unschärfe ist ja auch diese äh Vakuumfluktuationen  
40 und so weiter, das ist sind auch Dinge, die sie interessieren, dass das Vakuum gar nicht so ist  
41 und für ganz kurze Zeit, und wir machen es dann immer so drastisch, wie wärs im Makrokos-  
42 mos, wenn so was möglich wäre.

43 **C:** Ok. und die Impuls Ortsunschärfe, die war mit dem  $\downarrow$ Doppelspaltexperiment,  $\downarrow$

44 **A:** Ja, (...).

45 **C:** Ok, perfekt u n d zum dritten Begriff, den Sie genannt haben,

46 **A:** Schrödingers Katze, das kennen meistens die Schüler schon. da muss man drauf eingehen,  
47 das wird (1) bei manchen wird das auch in Philosophie ein bisschen (1) besprochen, aber nur  
48 bei manchen. ja und da ist es für mich auch sehr nett und (2) da verbindet auch schon fast  
49 jeder was damit. mit Schrödingers Katze.

50 **C:** Ok (1) und ähm da geht man einfach das Gedankenexperiment durch.

51 **A:** Ja. das Gedankenexperiment, das es einfach beide Zustände gibt und (1) ja und also auch  
52 das kollabieren der Wellenfunktion, und auch schon vorher, sobald man nachschaut bei der  
53 Messung und so was (...) ja das geht ohne Mathematik, man kann darüber reden, bringt ja eh  
54 die Schüler in eine ganz neue Gedankenwelt der Physik. also (2) der erste Weg zur klassi-  
55 schen äh von der klassischen Physik weg  $\downarrow$ u n d $\downarrow$

56 **C:** Sehr schön. und meine nächste Frage, gibt es aus Ihrer Sicht irgendwelche zentralen Be-  
57 griffe von der Quantenphysik, die man nicht in der Sekundarstufe II bringen kann, weil vielleicht  
58 zu viel Mathematik vorausgesetzt wird

59 **A:** Nein (1) ich machs ohne Mathematik. ich finde es reicht. natürlich gibt es diese Grenzen,  
60 (1) wenn man dann äh Quantenphysik ein bisschen mehr machen will, aber es geht sich zeit-  
61 mäßig eh nicht aus. wenn man sich den Lehrplan anschaut.

62 **C:** Also man stößt an die Grenzen, wenn man eh keine Zeit hat, um es im Detail zu machen.

63 **A:** Ja, es ist einfach auch von der Zeit her nicht möglich viel mehr zu machen, natürlich (1) bei  
64 interessierten Schülern da geht's weiter aber meistens (2) der Großteil der Klasse ist (1) da  
65 würde es fast reichen, da gibt es sogar in diesen, ich weiß nicht, die heißen nicht was ist was,  
66 aber ungefähr so, diese Bücher da, die ungefähr auf diesen Niveau gibt es auch schon Quan-  
67 tenphysik erklärt und Schrödingers Katze und den Doppelspalt, (1) also es geht wirklich auf  
68 ganz (1) niedrigen Niveau.

69 **C:** Sehr gut, ja (1) und die letzte Frage, die ich mir überlegt habe ist eigentlich eh schon be-  
70 antwortet, nämlich was wäre eigentlich ein guter Einstieg in die Quantenphysik, und das wäre  
71 bei der Optik mit dem Doppelspalt.

72 **A:** Ja.

73 **C:** Dann danke vielmals für das Interview.

## Interview 2: Stefan – Schüler der 8C des borg3

1 **Christian Desbalmes:** Die erste Frage, die ich mal stell ist einfach nur ähm was ist dein Name,  
2 und in welche Klasse gehst du und ist die Quantenphysik schon unterrichtet worden.

3 **Stefan:** Ähm ich heiße Stefan (...), ich gehe in die 8C u n d hatte seit der siebten Physik, zwei  
4 Jahre lang, also drei Jahre lang (1) zwei Stunden die Woche u n d wir hatten jetzt zum Schluss  
5 dann die Quantenphysik dabei.

6 **C:** Ok, und noch interessant ist, dass ihr einen musikalischen Schwerpunkt habt.

7 **S:** Genau.

8 **C:** Ok, ist Physik für dich überhaupt ein interessantes Fach,

9 **S:** Prinzipiell schon, weil viele Dinge, die wir im alltäglichen Leben sehen, passieren auf phy-  
10 sikalischen (1) Ebenen, oder halt auf physikalischen Gesetzen und so weiter, und deswegen  
11 ist es schon spannend und (1) ich find es schon wichtig, dass wir ein großes Spektrum von  
12 der Physik bekommen in der Schule, ja.

13 **C:** Dass man die Vorgänge auch versteht, die in der Welt passieren. ja perfekt, und wenn man  
14 jetzt im Detail fragt äh zur Quantenphysik, ist diese Thematik interessant für dich,

15 **S:** Ähm (2) Ich finds ein bissl schwer, weil man muss wirklich viel Hintergrund glaub ich wissen  
16 um das wirklich zu verstehen und (1) um die Theorie auch zu kapiern und verstehen halt,  
17 aber ich glaub (3) ich mein es ist schon wichtig, dass man es mal gehört hat, damit man weiß,  
18 um was es geht, aber (1) man muss es ja dann nicht vertiefend unterrichten mit der Mathematik  
19 oder sonstiges, weil das würden wir neben den ganzen anderen Fächern nicht auch noch (1)  
20 vom Zeitaufwand schaffen, glaube ich.

21 **C:** Bevor es unterrichtet worden ist (1) hast du da schon Verbindung gehabt zur <sup>L</sup>Quanten-  
22 physik, <sup>↓</sup>

23 **S:** Nein.

24 **C:** Ok, davor gar nichts gekannt. (2) das heißt, ist da irgendein Thema, was du ganz faszinie-  
25 rend findest, oder irgendwas wo du glaubst, dass die Quantenphysik für dein Leben relevant  
26 sein könnte,

27 **S:** (1) eigentlich nicht, weil ich meine, wir hatten es jetzt schon eine Zeit lang und es ist wirklich  
28 schwer zu verstehen um was es eigentlich geht, und deswegen kann ich eigentlich auch nicht  
29 viel damit assoziieren.

30 **C:** Das ist vollkommen L verständlich, J  
31 **S:** @(1)@  
32 **C:** Gibt's eher ein Thema, was du stattdessen intensiver lernen würdest, etwas anderes, was  
33 dich in der Welt interessiert, was man stattdessen machen könnte,  
34 **S:** Ich find die Astronomie sehr spannend, die könnt man ein bisschen genauer machen, weil  
35 da gibt's wirklich viel darüber u n d (1) ja.  
36 **C:** Na perfekt, vielen Dank für die Antwort auf jeden Fall, eine Frage hab ich noch ähm welche  
37 Vorstellung verbindest du mit der Quantenphysik, gibt es da irgendein Eindruck oder ein Wort,  
38 was du damit in Verbindung bringst,  
39 **S:** (4)  
40 **C:** Du musst auch nicht antworten L wenn, J  
41 **S:** @(2)@ Photonen.  
42 **C:** Photonen und Quantenphysik sehr schön. na gut danke vielmals fürs Interview.

### Interview 3: Schülerin der 8C des borg3

1 **Christian Desbalmes:** Die erste Frage, wie ist dein Name, in welche Klasse gehst du, und  
2 hast du schon Unterricht in Quantenphysik gehabt.  
3 **Schülerin:** Mein Name ist (.....), ich geh auch in die 8C u n d (1) hab jetzt das letzte Monat  
4 die Quantenphysik unterrichtet bekommen, (2)  
5 **C:** Ok und auch du bist von de Klasse mit dem musikalischen Schwerpunkt.  
6 **S:** Genau.  
7 **C:** Ok. sehr gut, dann die erste Frage, ist Physik ein interessantes Fach für dich,  
8 **S:** Das auf jeden Fall, weil wir viel anschneiden, was einfach für mich vorher unverständlich  
9 war und dann erklärt bekommen. (1) auch die Aspekte dafür mit denen wir jeden Tag zu tun  
10 haben, hab ich vorher einfach nicht so betrachtet, wie ich es jetzt betrachte, also (1) interessant  
11 auf jeden Fall, verständlich nicht immer. @(1)@  
12 **C:** Ok. Wegen der Mathematik nicht immer verständlich, L oder, J  
13 **S:** Wegen den ganzen Theorien einfach. (1) Also das theoretische, wenn das wäre, wäre das  
14 so, das ist für mich ein bisschen, also ich brauch Fakten. und diese (...) Theorien, die dann  
15 doch wiederlegt worden sind (.) das ist für mich schwer zu verstehen.  
16 **C:** Ok, und Fakten sind für dich Experimente, die gezeigt werden oder so.  
17 **S:** (nickt)  
18 **C:** Ok. super. (2) und wenn wir jetzt speziell fragen, zur Quantenphysik, ist das Thema für dich  
19 interessant,

20 **S:** (1) Interessant. (1) ja, aber auch sehr umfangreich und sehr (1) sehr schwer zu verstehen.  
21 um zu wissen, was man damit anfängt, braucht glaub ich kein Monat, sondern Jahre. @(1)@  
22 (1) auch eben im Studium, aber auf jeden Fall interessant.

23 **C:** Was fasziniert dich dabei am meisten,

24 **S:** (2) das ist so, (1) was ist faszinierend, es ist so ein (3) es zeigt das eigentlich Physik doch  
25 (1) widersprüchlich ist, aber doch wieder bewiesen werden kann, und das Ganze kann wieder  
26 widerlegt werden und, (1) also es ist irgendwie faszinierend, dass immer ein Widerspruch  
27 kommt, @(1)@ aber der wird dann wieder widerlegt mit anderen Fakten. also ganz ganz ver-  
28 wirrend teilweise. @(1)@

29 **C:** Ok und würdest du lieber ein anderes Thema stattdessen machen, genauer durchnehmen,

30 **S:** (2) was ich cool fände wär auf jeden Fall (1), dass man mehr darauf eingeht, was jetzt  
31 wirklich passiert, wenn (1) wenn es regnet und so, denn das wissen die meisten eigentlich gar  
32 nicht, diese ganz einfachen Sachen von der Physik, die einfach tagtäglich sind, oder auch das  
33 mit dem Lotuseffekt, warum das so ist, diese ganz einfachen Sachen. (1) die wären cool, wenn  
34 man das mehr zum Alltag beziehen könnte.

35 **C:** Genau, und da also noch mehr Schwerpunkt L darauf, J

36 **S:** Genau, also noch mehr Schwerpunkt, aber ich find, dass die Quantenphysik auch ange-  
37 schnitten gehört, weil man sollten einen Überblick bekommen (1) also (1) über ein Genre von  
38 Themen also.

39 **C:** Ok. super, ja. (2) g u t. Hast du irgendwelche Vorstellungen davon, (1) was Quantenphysik  
40 für unsere Gesellschaft bedeutet, oder für dein Leben,

41 **S:** (2) Nein. @(1)@

42 **C:** Ok. verbindest du irgendwelche Vorstellungen oder zentrale Aspekte mit der Quantenphy-  
43 sik, irgendwelche Worte,

44 **S:** Schrödingers Katze, Big Bang Theorie @(1)@ ja und nein (1) eigentlich (1) doch den Got-  
45 teswürfel und die Kugeln die eigentlich farbig sind, aber doch nicht farbig. das hab ich mir  
46 (.....) dabei.

47 **C:** Ok, super ja. und ähm habt's ihr viel Mathematik im Unterricht der Quantenphysik, oder ist  
48 es L eher, J

49 **S:** Nein das ist eher in den naturwissenschaftlichen Klassen (...).

50 **C:** Und die Sachen, die ihr dann unterrichtet bekommt, sind die dann eher gut verständlich,  
51 oder ist es verwirrend.

52 **S:** Gut verständlich, weil wir es auch so verklickert bekommen, also auch mit Experimenten  
53 und dann auch oft (1) Vorträge, also wir haben oft Vorträge gehabt u n d mit der Zeit versteht  
54 man das einfach, man frisst es nicht einfach nur in den Kopf hinein, (1) sondern man bekommt  
55 das Verständnis dafür.

56 **C:** Ja ok, also vielen Dank.

## Interview 4: Sebastian – Schüler der 7A des borg3

- 1 **Christian Desbalmes:** Wieder als erste Frage (.) wie ist dein Name, in welche Klasse gehst  
2 du und hast du schon einmal Quantenphysik unterrichtet bekommen.
- 3 **Sebastian:** Also mein Name ist Sebastian (...), ich geh in die 7A und Quantenphysik ja, haben  
4 wir schon unterrichtet bekommen ähm mit der Unschärferelation, Schrödingers Katze (1) Dop-  
5 pelspaltexperiment.
- 6 **C:** Und das war bis jetzt nur in der siebten Klasse,  
7 **S:** Nur in der siebten Klasse.
- 8 **C:** Ja ok, ist Physik für dich überhaupt ein interessantes Fach,  
9 **S:** Ja, ich bin sogar sehr interessiert, meine VWA handelt vom Untergang des Universums und  
10 ich lese auch QED von Feynman und ich find das (2) ich bin nicht gläubig und versuche für  
11 mich alles durch (1) Physik, Biologie zu erklären.
- 12 **C:** Ok, perfekt und du bist auch in einer naturwissenschaftlichen Schwerpunkt Klasse.  
13 **S:** (nickt)
- 14 **C:** Sehr gut, ja und wenn wir jetzt (.) genau fragen zur Quantenphysik, ist die Quantenphysik  
15 ein interessantes Thema für dich,  
16 **S:** (1) auf jeden Fall. wie wir das zum Beispiel mit Schrödingers Katze gemacht haben, hat  
17 mich das, sehr zum Nachdenken gebracht. weil man kann dieses Prinzip des Gedankenexpe-  
18 riments auf alles übertragen im Endeffekt. auf Beziehungen, auf ja-nein Fragen. (1) auf alles.
- 19 **C:** Und ist das auch die größte Faszination dabei, oder gibt es irgendein Thema der Quanten-  
20 physik, das dich noch mehr fasziniert,  
21 **S:** Ich finde, dass dieses Gedankenexperiment die größte Faszination für mich war.
- 22 **C:** Ok. das heißt du bist auch der Meinung, dass sie auf jeden Fall unterrichtet gehört,  
23 **S:** Ja, auf jeden Fall.
- 24 **C:** Und würdest du vielleicht irgendein anderes Thema stattdessen machen wollen, also (1)  
25 **S:** Ganz ehrlich, nein. weil sie ist für mich sowohl kompliziert, ich muss nachdenken, es ist  
26 nicht zu einfach, (2) und das macht mir einfach Spaß.
- 27 **C:** Sehr gut. welche Auswirkungen hat die Quantenphysik deiner Meinung nach für dich, oder  
28 für die Gesellschaft,  
29 **S:** Also für mich auf jeden Fall, dass es mich zum Nachdenken gebracht hat, (1) und für mein  
30 Umfeld (1) im Endeffekt alle Menschen (1) müssen sich erstmal damit beschäftigen, wie wir.
- 31 **C:** Ok. und von der Technologie her,  
32 **S:** Die Technologie ist sicherlich (1) durch die Quantenphysik extrem weit gekommen, und ich  
33 glaub auch, dass (3) das heutzutage nötig ist. das ist ganz <sup>L</sup> interessant (...), <sup>J</sup>  
34 **C:** Kein Computer könnte <sup>L</sup> ohne, <sup>J</sup>  
35 **S:** (...) ja die ganze Computerelektronik, (.....)

36 **C:** Ok. (1) welche Vorstellung verbindest du mit der Quantenphysik, oder was sind deiner Mei-  
 37 nung nach die zentralen Aspekte, oder Worte,  
 38 **S:** Mysterium. weil es eben so ist, dass wir noch nicht alles darüber wissen und auch nicht  
 39 alles erklären können, aber trotzdem noch ziemlich viel verstehen. also, wie wenn wir jetzt  
 40 sagen würden, das Monster von Loch Ness. das ist genauso ein Mysterium (1) man weiß nicht,  
 41 ob es mal existiert hat, oder nicht, man findet es auf jeden Fall nicht <sup>L</sup> und (.) <sup>J</sup>  
 42 **C:** Und mit welchen Experimenten würdest du es in Verbindung bringen,  
 43 **S:** also (1) experimentiert haben wir jetzt relativ wenig, aber ich bring damit in Verbindung das  
 44 Doppelspaltexperiment.  
 45 **C:** Ok, super. eine letzte Frage zur Mathematik, (1) fällt es dir leicht den Unterricht zu folgen,  
 46 oder ist es schwierig zu verstehen und welche Rolle spielt dabei die Mathematik.  
 47 **S:** Also ich sag mal so, früher war sie ein Hindernis, weil ich in allgemein Mathematik überfor-  
 48 dert war (1) und mittlerweile geht das. (1) insofern ist das nicht schwierig, ich komm locker mit,  
 49 auch wenn ich zu Hause mehr mach, als andere u n d ja, für mich überhaupt kein Problem.  
 50 **C:** Ok, super. danke vielmals für das Interview.

## Interview 5: Anna – Schülerin der 7A des borg3

1 **Christian Desbalmes:** Und die erste Frage wieder ähm wie ist dein Name, in welche Klasse  
 2 gehst du und wurdest du schon mal in Quantenphysik unterrichtet.  
 3 **Anna:** Also ich bin die Anna (...) ich geh in die 7A und wir haben in der sechsten Klasse  
 4 eigentlich schon einen Zettel über die Quantenphysik bekommen, eigentlich genau über das  
 5 Doppelspaltexperiment, und in der siebten haben wir uns mehr damit beschäftigt, weil wir jetzt  
 6 noch das mit der Schrödingers Katze und so, (1) das ganze gemacht haben und ja.  
 7 **C:** Ok. und auch du bist im naturwissenschaftlichen Schwerpunkt.  
 8 **A:** Ja. ich bin im naturwissenschaftlichen Schwerpunkt.  
 9 **C:** Ok. (1) ist Physik für dich ein interessantes Fach,  
 10 **A:** (2) im Teil so, bevor ich auf diese Schule gekommen bin, waren also Physik, Chemie und  
 11 Biologie eigentlich meine Lieblingsfächer, aber irgendwie seit dem ich in dieser Schule bin,  
 12 habe ich viel mehr das Interesse verloren, aber ich weiß nicht, liegt es an der Schule, liegt es  
 13 an den Lehrern oder liegt es <sup>L</sup> (.....) <sup>J</sup>  
 14 **C:** Liegt es vielleicht an der Mathematik,  
 15 **A:** Nicht wirklich. ich bin eigentlich, wenn ich ehrlich bin, in allen Fächern ziemlich gut. ich habe  
 16 einen schönen Notendurchschnitt, aber j a ich weiß nicht (1) es ist generell eigentlich ein inte-  
 17 ressanter Fach (1) also ich find's generell interessant u n d  
 18 **C:** Darf ich fragen, was dich dann mehr interessiert, welche Fächer,  
 19 **A:** Bei mir bis jetzt (.) eigentlich zurzeit Englisch, und Französisch. @(1)@ irgendwie komisch.



20 **C:** Nein, nein, mehr die Sprachen. (1) Sehr gut. ähm und wenn ich jetzt genau frage, zur  
 21 Quantenphysik, ist die Quantenphysik ein interessantes Thema für dich,  
 22 **A:** Ja, definitiv interessant für mich. Weil ich find, es ist nämlich so, äh es zeigt eigentlich, dass  
 23 es Sachen auf der Welt gibt, die man einfach nicht ändern kann, die man einfach so akzeptie-  
 24 ren muss. auch gewisse andere Sachen zum Beispiel (1) also ich verbinde das jetzt eher mit  
 25 banalen Sachen, wie Verlust, also wenn Menschen sterben. man muss es einfach akzeptieren,  
 26 man kann nichts dagegen tun und ja. und das find ich auch interessant, weil normalerweise,  
 27 in den Naturwissenschaften gibt es gewisse Sachen, wo man sagt, ja ok, das kann man so  
 28 machen, es gibt so Theorien dafür, man kann Formeln dafür anwenden und dann gibt es aber  
 29 so eine Sache, die muss man einfach akzeptieren. und ja (.....)  
 30 **C:** Ok, ja, (1) also würdest du dann kein anderes Thema stattdessen machen, das dich viel-  
 31 leicht mehr interessieren würde, als Quantenphysik.  
 32 **A:** (.) N e i n. Also ich finde generell alle Sachen interessant. aber ich find ja zum Beispiel, also  
 33 was ich sagen wollte, dass man Quantenphysik vielleicht erst in der achten Klasse unterrichten  
 34 sollte, weil ich find, dass in der Quantenphysik und der klassischen Physik, das ist ja ganz  
 35 anders. zum Beispiel bisher waren Teilchen immer Teilchen und Wellen immer Wellen und auf  
 36 einmal bekommt man gesagt, einfach so, ok das sind doch nicht Wellen und doch keine Teil-  
 37 chen. Das ist halt ziemlich kompliziert. wenn man davor schon nicht so gut in Physik war und  
 38 (1) ja es ist dann schon ziemlich schwer. und ich find generell, dass viele, die jetzt noch inte-  
 39 ressiert sind an der Physik, vielleicht das Interesse verlieren. (1) und ich find halt, dass man  
 40 das in der achten dann machen sollte, wenn man (.....)  
 41 **C:** Es wird sicher in der achten wieder kommen. @(1)@ gut. Welche Auswirkung hat die Quan-  
 42 tenphysik auf dein Leben oder auf die Gesellschaft,  
 43 **A:** Also ich find generell auf mein Leben und die Technologie positiv, weil ich bin eigentlich ein  
 44 Mensch der eher faul ist, ich spiel auch viel mit dem Computer und Handy und schaue Animes  
 45 und das Ganze an, (1) also ohne Quantenphysik kein Computer, keine Animes und so weiter.  
 46 **C:** Ok. welche zentralen Vorstellungen verbindest du mit der Quantenphysik, welche Worte  
 47 fallen dir dazu ein,  
 48 **A:** (2) (.....) einfach, was man einmal so akzeptieren muss und man nicht ändern kann. (.....)  
 49 **C:** Kann ich fragen, was du genau damit meinst,  
 50 **A:** (2) Ich hab das Gefühl, dass, (1) wenn man jemanden verliert der einem sehr nah ist, und  
 51 man kann nichts dagegen machen (.....) (traurige Stimme)  
 52 **C:** Ok. alles klar. (1) wie ist der Unterricht für dich, ist er schwer zu folgen,  
 53 **A:** Ich finde man muss einfach nur aufpassen, dann versteht man es. (1) ich pass eigentlich  
 54 ziemlich gut auf, nur ich merk zum Beispiel, bei manchen Mitschülern, die passen zum Beispiel  
 55 nicht auf und (1) die reden miteinander und schreiben teilweise was Falsches auf und dann

- 56 bei der Schularbeit verstehen sie es nicht. @(1)@ also wenn man aufpasst, dann finde ich es  
57 eigentlich nicht so extrem schwer.
- 58 **C:** Und die Mathematik dabei, ist die verständlich,
- 59 **A:** (2) Ja schon. man kriegt Formeln und man muss eigentlich einsetzen (.....)
- 60 **C:** Na gut. danke vielmals für das Interview.

## 7.2. Zusammenfassung/Abstract

### Zusammenfassung

Diese Diplomarbeit behandelt das Thema Quantenphysik in der Schule. Dabei wird im Detail auf die folgende Fragestellung eingegangen: Wie kann Schülerinnen und Schülern der Sekundarstufe II ein Zugang zu den zentralen Begriffen der Quantenphysik ermöglicht werden, der zum einen konzeptuell korrekt ist und zum anderen mit möglichst wenig mathematischem Formalismus auskommt? Um dieser Fragestellung nachzugehen wird zu Beginn der Arbeit geklärt, welche Rechtfertigung für die Aufnahme der Quantenphysik in den Lehrplänen der österreichischen Sekundarstufe II überhaupt besteht. Es wird aufgezeigt, welche zentralen Wesenszüge die Quantenphysik so besonders machen und von der klassischen Physik unterscheiden. In einem weiteren Schritt wird die Relevanz dieser Theorie für die Wissenschaft und die Gesellschaft präsentiert. Zusätzlich dazu werden Interviews mit Schülerinnen und Schülern der 11. und 12. Schulstufe herangezogen und es erfolgt ein Blick auf die aktuellen Lehrpläne der österreichischen Sekundarstufe II.

In weiterer Folge werden zentrale Begriffe der Quantenphysik präsentiert, die aus Sicht des Verfassers mit einem phänomenologischen Ansatz konzeptuell richtig vermittelt werden können. Die zentralen Aspekte, die dabei betrachtet werden, basieren auf den zuvor herausgearbeiteten Wesenszügen. Die einzelne Begriffe werden nacheinander, jeweils in einem eigenen Unterkapitel fachdidaktisch abgearbeitet. Das »Münchner Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik« von Rainer Müller und Hartmut Wieser dient dabei weitgehend als Grundlage. Im anschließenden Kapitel werden im Gegensatz dazu die Grenzen eines rein phänomenologischen Zugangs zur Quantenphysik aufgezeigt, indem Beispiele von zentralen Aspekten gebracht werden, deren konzeptuell richtiges Verständnis ein mathematisches Rüstzeug benötigt, welches den Schulstoff in der Regel übersteigt.

Abschließend wird das Ergebnis dieser wissenschaftlichen Arbeit mit dem derzeitigen Stand der Forschung verglichen. Zusätzlich dazu wird noch die Meinung einer Expertin bei der Unterrichtung von Quantenphysik in der Sekundarstufe II eingeholt, um eine abschließende Reflexion durchzuführen, wie man die Quantenphysik in der Sekundarstufe II unterrichten kann.

## Abstract

This diploma thesis investigates and describes how quantum physics can be taught in the upper secondary level of education, using a purely phenomenological approach. In the first part of the paper the author states, why it is valid to cover quantum physics at this level of education at all. Subsequently central concepts of quantum physics are presented, which from the authors perspective, can be taught correctly with a phenomenological approach. The individual concepts are sequentially presented from a didactical point of view. This section is based on the educational concept of Rainer Müller and Hartmut Wieser: »Das Münchner Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik«. In a further step the limitations of a purely phenomenological access to quantum physics are stated, showing examples of central concepts, which require mathematical methods for comprehensive understanding. In the final part of the paper, the results of this diploma thesis are compared to the current state of research. In addition, an interview with a physics teacher, revealing a practical didactical approach is reviewed. This enables a final reflection on the teaching of quantum physics in the upper secondary level.