



universität
wien

DIPLOMARBEIT / DIPLOMA THESIS

Titel der Diplomarbeit / Title of the Diploma Thesis

„Ein schulisches Unterrichtskonzept zur Quantenphysik“

verfasst von / submitted by

Albert Steiner, BSc

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of

Magister der Naturwissenschaften (Mag. rer. nat.)

Wien, 2020 / Vienna, 2020

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

UA 190 406 412

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

Lehramtsstudium UniStG
UF Mathematik
UF Physik

Betreut von / Supervisor:

Univ. -Prof. i. R. Dr. Romano Rupp

Inhalt

1 Einleitung	1
2 Methodenkapitel	2
3 Quantenmechanik	4
3.1 Historische Entwicklung der Quantenmechanik	4
3.2 Quantenmechanik im Schulunterricht.....	30
3.2.1 Verschiedene Schulbücher	31
3.2.2 Vergleich der Schulbücher	39
3.3 Forschungsstand Physikdidaktik	47
3.3.1 Unterrichtskonzepte	48
3.3.2 SchülerInnenvorstellungen	57
4 Unterrichtskonzept.....	61
4.1 Notwendige Voraussetzungen	61
4.2 Begriffe in der Quantenphysik.....	62
4.3 Historischer Hintergrund zu dem Begriff „Substanz“	62
4.4 Zustand in der klassischen Mechanik	63
4.5 Der Determinismus der klassischen Physik.....	63
4.6 Kritik an der deterministischen klassischen Physik	64
4.7 Die Zustandsbestimmung für quantenmechanische Objekte.....	65
4.8 Experimente zur Bestimmung des Zustandes	66
4.8.1 Erstes Experiment	67
4.8.2 Zweites Experiment	67
4.8.3 Drittes Experiment	68
4.8.4 Viertes Experiment	68
4.8.5 Fünftes Experiment	68
4.9 Die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation	69
4.10 Das Ding an sich.....	70
4.11 Der Messprozess.....	70

4.12 Naturgegebener Zufall	72
4.13 Beugung und Interferenz	73
4.13.1 Beugung	74
4.13.2 Interferenz	74
4.14 Praktischer Schulunterricht.....	75
4.14.1 Schulische Rahmenbedingungen	75
4.14.2 Stundenplanung auf Basis des Unterrichtskonzeptes	76
5 Diskussionskapitel.....	87
5.1 Vorteile und Nachteile des erstellten Unterrichtskonzeptes	87
5.2 Vorteile und Nachteile aktueller Unterrichtskonzepte	89
6 Zusammenfassung	91
7 Abstract	92
Literaturverzeichnis	93
Abbildungsverzeichnis	95

1 Einleitung

Die Quantentheorie ist eine der interessantesten Theorien der Physik. Wenn man daran denkt, dass man bereits im Vorschulalter bemerkt, dass ein Gegenstand zu Boden fällt, sobald man ihn loslässt, so wird deutlich, dass in quantenmechanischen Phänomenen eine besondere Herausforderung liegt, da sie sich der Beobachtbarkeit im Alltag entziehen. Man ist dazu angehalten sich auf neue Sichtweisen auf die Natur einzulassen. Gerade das macht die Quantenmechanik spannend und es kann sehr motivierend für Schülerinnen und Schüler sein, sich damit näher auseinanderzusetzen. Es gibt mehrere verschiedene Ansätze, um Quantenmechanik an einer Schule zu unterrichten. Viele Schulbücher schlagen den historischen Weg ein und geben einen Überblick über die wichtigsten Ecksteine in der Entwicklung der Quantenphysik. Es stellt sich die Frage, ob es möglich ist moderne Physik an einer Schule zu unterrichten und begriffliche Schwierigkeiten, welche historisch bedingt entstanden sind, zu vermeiden. Begriffe wie zum Beispiel Materiewelle, Welle-Teilchen-Dualismus oder Wellenlänge von Wahrscheinlichkeiten sind Relikte aus den 20er Jahren, als die Quantentheorie noch in einem frühen Stadium der Entstehung war. Es stellt sich die Frage, ob das Festhalten an diesen alten Begriffen zum zeitgemäßen Verständnis der modernen Physik beiträgt oder mehr Verwirrung stiftet als aufklärt.

An dieser Stelle ergibt sich die Frage, warum viele Schulbücher dem historischen Weg folgen und veraltete Begriffe verwenden. Dazu muss die historische Entwicklung der Quantentheorie beleuchtet werden und verschiedene Ansichten von Physikern müssen betrachtet werden. Es ist die Frage zu beantworten ob es einen fachdidaktischen Mehrwert, hat den Schulunterricht entlang der historischen Entwicklung aufzubauen. Dazu muss der aktuelle Forschungsstand in der Physikdidaktik herangezogen werden.

In der Fachdidaktik der Physik spielen SchülerInnenvorstellungen, welche meistens Fehlvorstellungen sind, eine wichtige Rolle. Die fachdidaktische Forschung führt Untersuchungen zu Fehlvorstellungen von Schülerinnen und Schülern durch und sammelt diese. Zum Thema Quantentheorie existieren verschiedene Vorstellungen von Jugendlichen, welche in die Erstellung von Unterrichtskonzepten einfließen. Es gibt keine Forschungsarbeiten, die genau wiedergeben, inwiefern Begriffe aus den Anfängen der modernen Physik SchülerInnenvorstellungen beeinflussen. Darauf

aufbauend ist es interessant, die Vorteile und Nachteile der jeweiligen Konzepte in Hinblick auf allgemeine fachdidaktische Prinzipien zu betrachten.

Der Wunsch nach einem möglichst umfassenden Blickwinkel auf die moderne Physik beschäftigt wahrscheinlich viele an Physik interessierten Menschen. Es ist naheliegend, den historischen Weg nachzuverfolgen, um auf dem aktuellen Wissensstand zu sein. Der Nachteil dieser Betrachtung ist, dass man viele Entwicklungsstationen durchlaufen und alle entstehenden Fehlvorstellungen ablegen muss, bis man am aktuellen Forschungsstand ist. Es stellt sich die Frage, ob es möglich ist, ein alternatives Unterrichtskonzept zu entwerfen, welches Schülerinnen und Schüler nicht mit den Fehlvorstellungen der Vergangenheit belastet, sondern direkt zum aktuellen Forschungsstand bringt und eine zeitgemäße Ansicht auf die moderne Physik gewährt. Auf Basis des Vorlesungsskriptums zu „Romanos Physikkurs 2“ von Professor Romano Rupp wird ein Unterrichtskonzept entwickelt. Dieses Skriptum enthält alle wichtigen Eckpunkte der modernen Physik und setzt den Fokus auf die genaue Abgrenzung des Begriffs des Zustands in der klassischen und modernen Physik. Die Kapitel zur modernen Physik werden für das zu erstellende Unterrichtskonzept herangezogen. Weitere fachdidaktische Werke werden für die Umsetzungen der Lerninhalte verwendet.

Die aktuellen Unterrichtskonzepte zur modernen Physik werden analysiert, ihre Vorteile und Nachteile besprochen und ein alternatives Unterrichtskonzept wird erstellt. Auf diese Weise kann ein Beitrag zur Fachdidaktik geleistet werden.

2 Methodenkapitel

Eine empirische Studie zu den Vorbereitungen und Umsetzungen eines Unterrichtskonzeptes verlangt nach viel Kapazität, die im Rahmen meiner Forschungsarbeit nicht bereitgestellt werden kann. Daher wird auf die Methode der Literaturarbeit zurückgegriffen.

Über das Thema „Quantenmechanik im Schulunterricht“ existieren mehrere fachdidaktische Konzepte. Das Münchner Unterrichtskonzept, welches das aktuellste Konzept darstellt und in den universitären Betrieb Einzug gefunden hat, wurde am genauesten studiert und fließt in diese Arbeit ein. Auch gibt es verschiedenste SchülerInnenvorstellungen, die ebenfalls berücksichtigt werden müssen.

Um den historischen Kontext näher zu beleuchten, wurde das Buch „Die Deutungen der Quantentheorie“ von Kurt Baumann und Roman Sexl herangezogen. Dieses Buch enthält und behandelt Originalabhandlungen von verschiedenen Physikern in chronologischer Reihenfolge. Es beschreibt die Ansichten dieser Physiker zu der damaligen aktuellen Situation zur Quantentheorie. In diesem Zusammenhang wird deutlich, wie unterschiedlich die Meinungen bezüglich der Quantenmechanik waren.

Um die aktuelle Situation im österreichischen Physikunterricht zu betrachten, werden zwei häufig in Österreich verwendete Schulbücher herangezogen, welche man in der Fachbibliothek für Physik ausborgen kann. Die Schulbücher erlauben einen Einblick in aktuelle Umsetzung der Quantentheorie in der Oberstufe, da sie als Grundlage für den Unterricht vieler Lehrkräfte dienen. Wie genau die einzelnen Lehrkräfte ihren Unterricht gestalten, ist aus Schulbüchern nicht ersichtlich, dennoch gewähren sie einen Einblick in den österreichischen Schulunterricht.

Das Kapitel „Moderne Physik“ im Vorlesungsskript „Romanos Physikkurs 2“ ist die Basis für das zu erstellende Unterrichtskonzept. Der rote Faden, der sich durch das Vorlesungsskript zieht, dient zur Orientierung für die fachdidaktische Umsetzung. Die fachdidaktische Literatur wird zur Abwägung der Vorteile und Nachteile der verschiedenen Unterrichtskonzepte herangezogen. Auf diese Weise kann ein Vergleich des zu erstellenden Unterrichtskonzeptes mit anderen im Rahmen der Physikdidaktik durchgeführt werden. Die Arbeit ist eine theoretische Literaturarbeit und bezieht sich nur auf den österreichischen Schulraum.

Mit Hilfe von ausgewählter Fachliteratur ist es möglich, Vorteile und Nachteile von verschiedenen Konzepten zur modernen Physik zu ermitteln. Das Unterrichtskonzept wird auf Basis allgemeiner Prinzipien und Strategien der Physikdidaktik für den Schulunterricht erstellt. Meine Hypothese lautet, dass ein Unterrichtskonzept, welches nicht den historischen Weg geht, im praktischen Schulunterricht möglich und von Vorteil für Schülerinnen und Schüler ist. Mittels Fachliteratur und klarer Trennung zwischen Interpretation und Diskussion wird eine Objektivität in der Vermittlung dieses Themas angestrebt.

3 Quantenmechanik

3.1 Historische Entwicklung der Quantenmechanik

Wie viele Theorien in der Wissenschaft hat sich auch die Quantenmechanik gewandelt und verändert. Die heutige Form hat sich erst entwickelt und im Laufe der Zeit herauskristallisiert. In diesem Kapitel soll der chronologische Verlauf der Quantentheorie beleuchtet und verschiedene Ansätze und Probleme dargestellt werden. Es gibt verschiedene Ansichten und Strömungen, wie man die Quantentheorie interpretieren kann. Ausgewählte Ansätze und Probleme werden in Hinblick auf die Forschungsfrage vorgestellt und erläutert. Um die heutige Form der Quantenmechanik besser zu verstehen, kann es hilfreich sein, den historischen Kontext und die Wandlung verschiedener Begriffe nachvollziehen zu können.

Der Grundstein der Quantenmechanik

Den Grundstein der Quantentheorie legte Max Planck um 1900 mit der Quantisierung der atomaren Resonatoren um das theoretisch hergeleitete Strahlungsgesetz in Einklang mit den empirischen Ergebnissen zu bringen. Albert Einstein kritisiert, dass ein reiner Modellstandpunkt, der einmal Welleneigenschaften und ein andres Mal Teilcheneigenschaften zur Erklärung von Phänomen heranzieht, nicht den Dualismus Welle-Teilchen erklären kann. Beide Eigenschaften tragen zur Beschreibung der Phänomene bei und keine darf vernachlässigt werden.

1924 übertrug Louis de Broglie die zunächst nur für Licht geltenden Beziehungen

$$E = h\nu,$$

$$p = \frac{h}{\lambda},$$

auf beliebige andere Mikroobjekte, wie Elektronen, Protonen oder Atome. Der Dualismus Welle-Teilchen war damit in seiner vollen Allgemeinheit formuliert, und es galt tragfähige Fundamente für den Aufbau der Physik im Mikrokosmos zu finden.

Heisenberg – Einstein – Schrödinger – Born

Das Problem der Quantentheorie war. Quantenmechanische Objekte besitzen sowohl Teilchen- als auch Welleneigenschaften. Im Folgenden werden einige der vielen verschiedenen Lösungsansätze diskutiert.

Heisenberg versucht seine Theorie nur auf beobachtbare Größen aufzubauen. Für ihn sind der Ort und die Geschwindigkeit eines Elektrons in einem stationären Zustand nicht existent. Diese Anschauung wird von Einstein grundsätzlich abgelehnt.

Schrödinger versucht einen anderen Ansatz. Er versucht von den Wellenfunktionen, die der Schrödingergleichung genügen, eine Anschauung zu erschaffen, in der die Wellenfunktionen keine statistische Wahrscheinlichkeit beschreibt, sondern das Teilchen direkt darstellen soll.

Max Born gibt sich mit keiner Interpretation zufrieden und formuliert eine andere Möglichkeit. Für ihn sind Ort und Bahn des Teilchens unbestimmte, aber existierende Größen, über die nur Wahrscheinlichkeitsaussagen getroffen werden können.

Werner Heisenberg schreibt in seiner Arbeit „Über quantentheoretische Umdeutung der kinematischer und mechanischer Beziehung“:

„Bekanntlich lässt sich gegen die formalen Regeln, die allgemein in der Quantentheorie zur Berechnung beobachtbarer Größen (z.B. der Energie im Wasserstoffatom) benutzt werden, der schwerwiegende Einwand erheben, dass jene Rechenregeln als wesentlichen Bestandteil Beziehungen enthalten zwischen Größen, die scheinbar prinzipiell nicht beobachtet werden können (wie z.B. Ort, Umlaufzeit des Elektrons), dass also jenen Regeln offenbar jedes anschauliche physikalische Fundament mangelt, wenn man nicht immer noch an der Hoffnung festhalten will, dass jene bis jetzt unbeobachtbaren Größen später vielleicht experimentell zugänglich gemacht werden könnten.“ [Ludwig, 1925, S.193]

Er versucht eine der klassischen Mechanik analoge quantentheoretische Mechanik auszubilden, die nur Beziehungen zwischen beobachtbaren Größen aufweist. Für ihn sind die einzigen beobachtbaren und unzweifelhaften Eigenschaften der Atome die Frequenzen und Intensitäten ihrer Spektrallinien.

Heisenberg meint, dass Ort und Geschwindigkeit des Elektrons in einem stationären Zustand nicht existieren. Also dürften derartige Größen auch in der theoretischen Beschreibung der Natur nicht vorkommen. Aber, wie sich zeigte, musste Heisenberg auch Größen aufnehmen, die als nicht physikalisch erkannt wurden. Er musste Rechengrößen in seine Theorie aufnehmen in Form von komplexen Matrizen.

Diese Einstellung wurde von Albert Einstein kritisiert:

„Vom prinzipiellen Standpunkt aus ist es ganz falsch, eine Theorie nur auf beobachtbare Größen gründen zu wollen. Denn es ist ja in Wirklichkeit genau umgekehrt. Erst die Theorie entscheidet darüber, was man beobachten kann. Sehen sie, die Beobachtung ist ja im Allgemeinen ein sehr komplizierter Prozess. Der Vorgang, der beobachtet werden soll, ruft irgendwelche Geschehnisse in unserem Messapparat hervor. Als Folge davon laufen dann in diesem Apparat weitere Vorgänge ab, die schließlich auf Umwegen den sinnlichen Eindruck und die Fixierung des Ergebnisses in unserem Bewusstsein bewirken. Auf diesem ganzen langen weg vom Vorgang bis zur Fixierung des Ergebnisses in unserem Bewusstsein müssen wir wissen, wie die Natur funktioniert, müssen wir die Naturgesetze wenigstens praktisch kennen, wenn wir behaupten wollen, dass wir etwas beobachtet haben. Nur die Theorie, erlaubt uns also, aus dem sinnlichen Eindruck auf den zugrundeliegenden Vorgang zu schließen.“ [Heisenberg, 1969, S.92]

Einstein ist der Ansicht, dass zuerst eine Theorie aufgestellt werden soll und im Nachhinein überprüft wird, ob die Theorie mit dem Experiment übereinstimmt. Mit anderen Worten sollte das Experiment so aufgebaut werden, dass es eine Theorie falsifizieren kann. Eine Theorie sollte nicht so aufbauen sein, dass sie auf die Ergebnisse eines Experimentes hin getrimmt ist.

Schrödinger auf der anderen Seite schenkt dem Wellencharakter mehr Aufmerksamkeit. Er formuliert eine Wellenmechanik, die der Matrizenmechanik Heisenbergs äquivalent ist. Er benutzt Wellenfunktionen, um einen Zustand zu beschreiben. Die Bedeutung der Wellenfunktion bleibt zunächst ungeklärt, er schreibt dazu lediglich:

„Es liegt sehr nahe die Funktion ψ auf einen Schwingungsvorgang im Atom zu beziehen, dem die Elektronenbahnen heute vielfach bezweifelte Realität in höherem Maße zukommen als ihnen. (...) Ich möchte auch jetzt noch nicht weiter auf die Erörterung der Vorstellungsmöglichkeiten über diesen Schwingungsvorgang eingehen, bevor etwas kompliziertere Fälle in der neuen Fassung mit Erfolg durchgerechnet sind.“ [Schrödinger, 1926, S.372]

Bei der Betrachtung des harmonischen Oszillators spekuliert Schrödinger darauf, dass es möglich ist, dass durch Überlagerung von Wellenfunktionen Wellengruppen

(Wellenpakete) entstehen, die sich nicht im Laufe der Zeit auf ein immer größer werdendes Gebiet ausbreiten. Er wollte damit ein nicht-dualistisches Bild des Wasserstoffelektrons schaffen.

Schrödingers Deutung der Wellenfunktion ψ , wonach $\psi\psi^*$ die Dichte der Elektrizität als Funktion der Raumkoordinaten und der Zeit darstellen, ist unhaltbar.

Die erste Formulierung der heute akzeptierten Interpretation der Wellenmechanik stammt von Max Born („Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge (vorläufige Mitteilung)“ [Born, 1926, S.863]). Hier kommt erstmals die Deutung des Absolutquadrates als Wahrscheinlichkeitsdichte vor.

Born meint, er sei beeinflusst durch Einsteins Vorstellung, dass die Intensität des elektromagnetischen Feldes proportional zur Dichte der Lichtquanten ist. Max Born schreibt zur Interpretation der Quantenmechanik:

„Die von Heisenberg begründete und gemeinsam mit Jordan sowie dem Verfasser dieser Mitteilung (Born) entwickelte Matrizenform der Quantenmechanik geht von dem Gedanken aus, dass eine exakte Darstellung der Vorgänge in Raum und Zeit überhaupt unmöglich ist, und begnügt sich daher mit der Aufstellung von Relationen zwischen beobachtbaren Größen, die nur im klassischen Grenzfall als Eigenschaften von Bewegungen gedeutet werden können. Schrödinger auf der anderen Seite scheint den Wellen, die er nach de Broglies Vorgang als die Träger der atomaren Prozesse ansieht, eine Realität von derselben Art zuzuschreiben, wie sie Lichtwellen besitzen; er versucht, Wellengruppen aufzubauen, welche in allen Richtungen relativ kleine Abmessungen haben und die offenbar die bewegte Korpuskel direkt darstellen sollen.

Keine dieser beiden Auffassungen scheint mir befriedigend. Ich möchte versuchen, hier eine dritte Interpretation zu geben und ihre Brauchbarkeit an den Stoßvorgängen zu erproben. Dabei knüpfe ich an eine Bemerkung Einsteins über das Verhältnis von Wellenfeld und Lichtquanten an; er sagte etwa, dass die Wellen nur dazu da seien, um den korpuskularen Lichtquanten den Weg zu weisen, und er sprach in diesem Sinne von einem ‚Gespensterfeld‘. Dieses bestimmt die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Lichtquant, der Träger von Energie und Impuls, einen bestimmten Weg einschlägt; dem Felde selbst aber gehört keine Energie und kein Impuls an.

Diesen Gedanken direkt mit der Quantenmechanik in Verbindung zu setzen, wird man wohl besser solange verschieben, bis die Einordnung des elektromagnetischen Feldes in den Formalismus vollzogen ist. Bei der vollständigen Analogie zwischen Lichtquant und Elektron aber wird man daran denken, die Gesetze der Elektronenbewegung in ähnlicher Weise zu formulieren. Und hier liegt es nahe, die de Broglie-Schrödingerschen Wellen als das ‚Gespensterfeld‘ oder besser ‚Führungsfeld‘ anzusehen.

Ich möchte also versuchsweise die Vorstellung verfolgen: Das Führungsfeld, dargestellt durch eine skalare Funktion ψ der Koordinaten aller beteiligten Partikeln und der Zeit, breitet sich nach der Schrödingerschen Differenzialgleichung aus. Impuls und Energie aber werden so übertragen, als wenn Korpuskeln (Elektronen) tatsächlich herumfliegen. Die Bahnen dieser Korpuskeln sind nur soweit bestimmt, als Energie- und Impulssatz sie einschränken; im Übrigen wird für das Einschlagen einer bestimmten Bahn nur eine Wahrscheinlichkeit durch die Werteverteilung der Funktion ψ bestimmt. Man könnte das, etwas paradox, etwa so zusammenfassen: Die Bewegung der Partikeln folgt Wahrscheinlichkeitsgesetzen, die Wahrscheinlichkeit selbst aber breitet sich im Einklang mit dem Kausalgesetz aus.“ [Born, 1926, S.803]

Born betrachtet Ort und Bahn des Teilchens als unbestimmte, aber existierende Größen, deren Wahrscheinlichkeitsverteilung aus der Quantenmechanik folgt. Teilchen werden klassisch betrachtet, aber es sind nur Wahrscheinlichkeitsaussagen möglich.

Diese Anschauung führt zu einer Reihe von Widersprüchen. Die ψ -Funktion im Grundzustand des Wasserstoffatoms ist nicht null für große Entfernung vom Atomkern. Außerdem treten Probleme bei Beugung von Materiewellen an einem Gitterstrich auf. Obwohl ein Massenpunkt, der vom Gitter reflektiert wird, nur mit wenigen Gitterstrichen in Wechselwirkung treten kann, hängt die Schärfe des Beugungsbildes vom Gitter in seiner gesamten Ausdehnung ab.

Heisenberg – Bohr - Greenberger

Nach dem Heisenberg und Schrödinger von Einstein und Born kommentiert worden sind, wird die Unschärferelation Heisenbergs vorgestellt. Heisenberg kann aufzeigen, dass die klassische Genauigkeit nie diese Relation verletzt. Gemäß Heisenbergs Interpretation sind Ort und Impuls eines Elektrons nur soweit

bestimmt, wie es die Unbestimmtheitsgleichung zulässt. Er bezeichnet es als eine Art Verschmierung bzw. Überlagerung der Zustände. Diese Anschauungsmöglichkeit wird anhand des Doppelspaltes erläutert, von Bohr kommentiert und mündet in der Formulierung der Komplementarität von Welle und Teilchen, die Bohrs Anschauung dominiert.

Eine geschlossene Interpretation der Quantenmechanik gab erst Werner Heisenberg 1927 mit seinem Artikel „Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik“, in dem zum ersten Mal von der Unschärferelation gesprochen wird, die in den meisten Lehrbücher zur Quantenmechanik eine zentrale Rolle spielt.

Für den Spezialfall des Impuls- und Ortsoperators gilt die Gleichung:

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

mit Δx als Ortsunschärfe und Δp als Impulsunschärfe des Elektrons.

Hier stellt sich die Frage, unter welchen Umständen diese Größen messbar sein würden. Es scheint, dass es Situationen gibt, in denen der Begriff „Bahn“ für Elektronen sinnvoll ist, wie in der Wilson Kammer, und andere, in denen eine Bahnmessung prinzipiell ausgeschlossen ist, wie im Inneren des Atoms. Also ist es notwendig, bestimmte Experimente anzugeben, mit deren Hilfe man den Ort eines Elektrons messen möchte; anders hat der Begriff „Bahn“ eines Elektrons keine Aussagekraft. Eine Möglichkeit, die Bahn eines Elektrons zu bestimmen, ist das Heisenberg-Mikroskop. Daraus folgt die Unbestimmtheitsrelation, die besagt, dass Ort und Impuls des Elektrons nicht gleichzeitig beliebig genau messbar sind, wenn das dazu verwendete Licht der Quantenmechanik folgt.

„Je genauer der Ort bestimmt ist desto ungenauer der Impuls und umgekehrt. (...) Im Augenblick der Ortsbestimmung, also dem Augenblick, in dem das Lichtquant vom Elektron ab gebeugt wird, verändert das Elektron seinen Impuls unstetig.“
[Heisenberg, 1927, S. 172]

In der Wilsonkammer existiert die Bahn nicht als idealisierte mathematische Linie, sondern infolge der Unbestimmtheitsrelation stets mit einer nicht vernachlässigbaren Unschärfe der Position. Im Atom dagegen hat es überhaupt keinen Sinn, von einer Bahn zu sprechen.

Hier ist eine Wurzel einer umstrittenen Deutung der Unschärferelation, wonach die Unschärfe durch den Eingriff des Beobachters bei der Messung ins Spiel komme, also verursacht aufgrund von „unvorhergesehene und unkontrollierbare Störung des Mikroobjekts durch die Beobachtung“. Das weist zwar auf die Untrennbarkeit von Beobachter und Mikroobjekt in der Quantenmechanik hin ist aber eher ein ‚Relikt‘ einer frühen Version der „Born’schen Deutung“, wonach Elektronen einen wohlbestimmten Ort und Impuls haben, von dem aber eben nur eine Wahrscheinlichkeitsverteilung bekannt ist.

Heisenberg beweist durch sein Gedankenexperiment, dass unsere Kenntnis von Ort und Impuls eines klassischen Elektrons (Teilchen) nie die Unbestimmtheitsrelation verletzt, wenn das zur Beobachtung verwendete Licht der Quantentheorie gehorcht. Bei der allgemeinen Formulierung und dem Beweis dieser Relation ist keine Rede von einem „Eingriff des Beobachters“ oder einer „unkontrollierbaren Störung“. Die Unbestimmtheitsrelation folgt vielmehr ganz allgemein aus den Postulaten der Quantenmechanik und gilt für beliebige Wellenfunktionen.

Die entscheidende Überprüfung der Anschauung Heisenbergs ist das Doppelspaltexperiment. Beim Doppelspalt kommen, wenn beide Spalte offen sind, die aus der Welleneigenschaft erklärbaren Interferenzmuster zum Tragen. Im Teilchenbild ist die Aufenthaltsverteilung nicht erklärbar. Warum sollte das Vorhandensein eines weiteren Spaltes in irgendeiner Weise das Teilchen beeinflussen?

Bohr berichtete im Oktober 1927 in Brüssel („Diskussion mit Einstein über erkenntnistheoretische Probleme in der Atomphysik“) von einer Anordnung eines Einzelspaltversuchs, bei dem sich zwischen Spalt und Fotoplatte ein Doppelspalt befand. Durch Impulsmessung des Spaltes müsste es möglich sein, so Einstein, anzugeben, durch welchen Spalt beim Doppelspalt das Teilchen gegangen ist. Allerdings existiert eine gewisse Unschärfe bezüglich der Lage der Blende, die das Auftreten der in Frage stehenden Interferenzphänomene ausschließen würde.

Niels Bohr schreibt dazu:

„(...) Dieser Punkt ist von großer logischer Tragweite, denn nur der Umstand, dass wir vor der Wahl stehen, entweder den Weg des Teilchens zu verfolgen oder Interferenzwirkungen zu beobachten, gestattet es uns, dem paradoxen Schluss zu

entgehen, dass das Verhalten eines Elektrons oder Photons von dem Vorhandensein eines Schlitzes im Schirm abhängen sollte, durch den es nachweisbar nicht hindurch gegangen ist. Wir haben hier ein typisches Beispiel dafür, wie die komplementären Phänomene unter sich gegenseitig ausschließenden Versuchsanordnungen auftreten, und wir stehen bei der Analyse der Quanteneffekte vor der Unmöglichkeit, eine scharfe Trennungslinie zwischen einem unabhängigen Verhalten atomarer Objekte und ihrer Wechselwirkung mit dem Messgerät zu ziehen, die zur Definition der Bedingungen für das Auftreten der Phänomene gilt.“ [Bohr, 1979, S.128 ff.]

Die Unbestimmtheitsrelationen werden hier zum Nachweis herangezogen, dass zwischen Teilchentheorie und Wellentheorie keinerlei Widersprüche auftreten. Solange man nicht beobachtet, durch welchen Spalt das Elektron (oder Photon) hindurchgegangen ist, hat es nach Heisenberg auch keinen Sinn zu fragen, welche Bahn es eingeschlagen hat. Beobachtet man die Bahn aber, so zerstört man dadurch die Interferenzerscheinungen. Licht verhält sich wie eine Welle, wenn die Experimente entsprechend aufgebaut werden, und als Teilchen, wenn umgekehrt. Diese Komplementarität ist hier im Extremen formuliert.

Bohr - Heisenberg

Die Unbestimmtheitsrelation von Heisenberg wurde vorgestellt. Das Doppelspaltexperiment wurde herangezogen, um Heisenbergs Überlegungen zu prüfen. Bohr formuliert die Komplementarität von Quantenobjekten und legte sie seiner Anschauung der Komplementarität zu Grunde.

Jetzt werden Folgerungen aus seiner Anschauung betrachtet. Bohr geht davon aus, dass eine Raum-Zeit-Beschreibung und die Forderung von Kausalität sich aufgrund der unkontrollierbaren Störung bei der Beobachtung ausschließen. Des Weiteren zeigt er die Unzulänglichkeit der Beschreibung der Phänomene auf, die unweigerlich in klassischen Begriffen erfolgen muss. Wenn bei einem Experiment die Welleneigenschaft tragend ist und bei einem anderen die Teilcheneigenschaft, schließt das eine Experiment das andere aus, aber nur beide gemeinsam beschreiben das gesamte Phänomen.

Die Diskussion zwischen Niels Bohr und Werner Heisenberg in den Jahren 1926 und 1927 in Kopenhagen waren zwar nicht unumstritten, aber jahrzehntelang die „offizielle“ Interpretation der Quantenmechanik.

Bohr und Heisenberg erachten unterschiedliche Ansatzpunkte als wesentlich und ihre Meinung veränderte sich im Laufe der Zeit. In „Das Quantenpostulat und die neuere Entwicklung der Atomistik“ schreibt Niels Bohr:

„Nun bedeutet aber das Quantenpostulat, dass jede Beobachtung atomarer Phänomene eine nicht zu vernachlässigende Wechselwirkung mit dem Messungsmittel fordert, und dass also weder den Phänomenen noch dem Beobachtungsmittel eine selbstständige physikalische Realität im gewöhnlichen Sinne zugeschrieben werden kann. Überhaupt enthält der Begriff der Beobachtung eine Willkür, in dem er wesentlich darauf beruht, welche Gegenstände mit zu dem zu beobachtenden System gerechnet werden. (...) Dieser Sachverhalt bringt weitgehende Konsequenzen mit sich. Einerseits verlangt die Definition des Zustandes eines physikalischen Systems, wie gewöhnlich aufgefasst, das Ausschließen aller äußeren Beeinflussungen; dann ist aber nach dem Quantenpostulat auch jede Möglichkeit der Beobachtung ausgeschlossen, und vor allem verlieren die Begriffe Zeit und Raum ihren unmittelbaren Sinn. Lassen wir andererseits, um Beobachtungen zu ermöglichen, eventuelle Wechselwirkung mit geeigneten, nicht zum System gehörigen, äußeren Messungsmitteln zu, so ist der Natur der Sache nach eine eindeutige Definition des Zustandes des Systems nicht mehr möglich, und es kann von Kausalität im gewöhnlichen Sinn keine Rede sein. Nach dem Wesen der Quantentheorie müssen wir uns also damit begnügen, die Raum-Zeit-Darstellung und die Forderung der Kausalität, deren Vereinigung für die klassischen Theorien kennzeichnend ist, als komplementäre aber einander ausschließende Züge der Beschreibung des Inhaltes der Erfahrung aufzufassen, die die Idealisierung der Beobachtungs- bzw. Definitionsmöglichkeiten symbolisieren.“ [Bohr, 1928, S. 246]

Wegen der nicht zu vernachlässigenden Wechselwirkung mit dem Messapparat bei jeder Beobachtung kommt ein ganz neues unkontrollierbares Element hinzu. Bohrs Meinung lässt sich folgendermaßen zusammenfassen:

- 1) Raum-zeitliche Beschreibungen eines Vorganges erfordern Beobachtungen (beispielsweise einer Bahn)
- 2) Beobachtungen bedingen unkontrollierbare Störungen des betrachteten Objekts

- 3) Unkontrollierbare Störungen machen das Kausalgesetz unanwendbar, da das weitere Verhalten des Objekts nicht vorhergesagt werden kann.
- 4) Raum-zeitliche Beschreibungen eines Vorganges und die Forderung der Kausalität schließen einander deshalb aus, sie sind zueinander „komplementär“

Dazu kommt noch eine andere Facette der „Komplementarität“. Bohr meinte, dass wir bisher glaubten, zwischen dem Verhalten der Objekte und der zu ihrer Beobachtung notwendigen Geräte scharf unterscheiden zu können. Wir wenden Begriffe des täglichen Lebens an (verfeinert mit der Terminologie der klassischen Physik), um physikalische Experimente zu beschreiben, die mitteilbar und reproduzierbar sein sollen. Das gilt nicht nur für die Beschreibung des Bauens und Bedienung der Messgeräte, sondern auch für die Beschreibung der Messresultate.

„Es gibt kein Ergebnis eines Experiments, dass ein im Prinzip außerhalb des Bereiches der klassischen Physik liegendes Phänomen so gedeutet werden kann, dass es Aufschluss über unabhängige Eigenschaften der Objekte liefern kann. Es ist vielmehr unlöslich mit einer Situation verbunden, in deren Beschreibung auch die mit den Objekten in Wechselwirkung stehenden Messgeräte als wesentliches Glied eingehen.“ [Bohr, 1939, S.22]

Darin liegt, glaubt Bohr, die Aufklärung der scheinbaren Widersprüche, wenn man versucht, mit Hilfe der gewonnenen Ergebnisse aus verschiedenen Versuchsanordnungen, ein einziges anschauliches Bild zusammenzufassen.

„Die unter bestimmten einander ausschließenden Versuchsbedingungen gewonnenen Aufschlüsse über das Verhalten eines und desselben Objekts können treffend als *komplementär* bezeichnet werden, da sie obgleich ihrer Beschreibung mit Hilfe von alltäglichen Begriffen nicht zu einem einheitlichen Bilde zusammengefasst werden können, doch jeder für sich gleich wesentliche Seiten der Gesamtheit aller Erfahrungen über das Objekt ausdrücken, die überhaupt in jenem Gebiet möglich sind.“ [Bohr, 1939, S.22]

„Wie weit auch die Phänomene den Bereich klassischer physikalischer Erklärung überschreiten mögen, die Darstellung aller Erfahrungen in klassischen Begriffen erfolgen muss.“ [Bohr, 1939, S.22]

Mit dem Wort „*Experiment*“ wird auf eine Situation hingewiesen, in der wir anderen mitteilen können, was wir getan haben und was wir gelernt haben, d. h. müssen die Versuchsanordnung und die Beobachtungsergebnisse in klassischen Begriffen darstellen.

„Unmöglichkeit einer scharfen Trennung zwischen dem Verhalten atomarer Objekte und der Wechselwirkung mit den Messgeräten, die zu Definition der Bedingungen dienen, unter welchen die Phänomene erscheinen.“ [Bohr, 1939, S.22]

Jeder Versuch einer Teilung der Quanteneffekte würde zu einer Änderung in der Versuchsanordnung führen und somit neue, prinzipiell unkontrollierbare Möglichkeiten der Wechselwirkung zwischen den Objekten und den Messgeräten herbeiführen. Material, welches unter verschiedenen Versuchsbedingungen gewonnen wurde, kann nicht zu einem einzigen anschaulichen Bild zusammengefügt werden, es ist vielmehr als komplementär zu betrachten. Erst die Gesamtheit aller Phänomene gibt die möglichen Aufschlüsse über die Objekte erschöpfend wieder.

Bohr stellt die Notwendigkeit einer klassischen Beschreibung der Welt und die Komplementarität an den Ausgangspunkt seiner Deutung der Quantentheorie, Heisenberg vielmehr die Unschärferelation (also den mathematischen Formalismus) im Vordergrund. Für Bohr ist dieser Formalismus nur spezieller Ausdruck des allgemeinen Prinzips der Komplementarität.

Heisenberg - Neumann

Heisenberg und Bohr sind Vertreter der Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik. Eines der Merkmale der Kopenhagener Deutung ist der Kollaps der Wellenfunktion, der durch den Messvorgang einen Zustand festlegt. Dieses Problem wird von John von Neumann betrachtet, und er legt einen Lösungsvorschlag vor.

Neumann geht davon aus, dass bei einer Messung das Messobjekt und der Messapparat aneinandergeschaltet werden. Er kommt zu dem Schluss, dass diese Kopplung gar nicht zu einer Zustandsreduktion führt, wie man annehmen möchte, sondern erst die Messung der Zeigerdarstellung des Messapparats, welche wiederum ein Messprozess ist, einen Zustand auswählt. Das führt auf einen

unendlichen Regress, aufgrund dessen Neumann den Grund der Zustandsreduktion im menschlichen Bewusstsein sucht.

Das grundlegende Problem der Quantenmechanik ist, dass sie nur Möglichkeiten des Geschehens gibt, aber zunächst mal unbeantwortet lässt, wann diese Möglichkeit zur Wirklichkeit wird. Dies geschieht nur gerade bei der Messung, bei der tatsächlich der Wert einer Observablen festgestellt wird. In diesem Moment findet eine diskontinuierliche Entwicklung der Wellenfunktion statt, eben die „Reduktion des Wellenpaketes“, die im eklatanten Gegensatz zur kontinuierlichen Entwicklung der Wellenfunktion steht, die durch die Schrödingergleichung beschrieben wird.

Diese Sonderstellung des Messprozesses, der gleichsam aus der normalen physikalischen Beschreibung herausfällt, machte eine quantenmechanische Theorie der Messung zu einer vordringlichen Aufgabe. Ein erster Ansatz ist in Heisenbergs Theorie der Ortsmessung mit einem Mikroskop zu sehen. Die erste systematische Theorie des Messprozesses wurde erst von John von Neumann einige Jahre später in „Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik“ [Neumann, 1932] entwickelt.

In der Theorie betrachtet Neumann ein quantenmechanisches System, das aus einem Messobjekt S und Messapparat A besteht. Zu Beginn seien beide Teile des Systems getrennt. Sie werden während des Messvorganges aneinandergeschaltet. Vor der Messung sei S in wohldefinierten (reinen) Zustand. Zur Vereinfachung sei auch der Messapparat in einem reinen Zustand. Unsere Kenntnis des Gesamtsystems ist also vor der Messung maximal (schöpft also die naturgesetzlichen Grenzen aus).

Nach der Messung gibt es eine sogenannte *Verschränkung* von Messobjekt und Messapparat. Falls der Zeiger des Messapparats in Stellung 1 steht, dann befindet sich das Messobjekt im Zustand ψ_1 , bei der Zeigerdarstellung 2 im Zustand ψ_2 usw. Über jeden der beiden Systemteile weiß man also nach der Messung weniger als zuvor (solange die Zeigerdarstellung nicht abgelesen ist). Die Verschränkung erlaubt es uns aber, Eigenschaften des Objektes am Messgerät abzulesen.

Hier sieht sich Neumann mit dem Grundproblem der Quantenmechanik konfrontiert: Die Kopplung von Messobjekt und Messapparat führt gar nicht zu einer Zustandsreduktion, sondern erst die Messung der Zeigerdarstellung des

Messapparats. Aber die Messung der Zeigerdarstellung ist auch ein Messprozess. Jetzt ist (S plus A) Messobjekt, das mit einem Apparat B in Wechselwirkung tritt. Aber auch B sollte den Regeln der Quantenmechanik genügen. Das führt auf einen unendlichen Regress. Man gelangt offenbar nie zum Ziel einer vollzogenen Messung mit wohldefiniertem Ergebnis, aus Möglichkeit wird niemals Wirklichkeit. Um diesen unendlichen Regress zu vermeiden, nimmt Neumann an, dass die Reduktion der Wellenfunktion durch die Wahrnehmung des menschlichen Beobachters vollzogen wird. Die Kopplung kann man weiterführen auf die Photonen, die mit dem Zeiger wechselwirken, dann die Photonen, die mit dem Auge wechselwirken, dann auf den elektrische Impuls zum Gehirn usw.

Neumann

Von Neumann hat seine Anschauung zum Messvorgang formuliert. Als nächstes behandelt er das Problem des Determinismus, welches bei einer Theorie, die nur Wahrscheinlichkeitsaussagen über ein Messergebnis zulässt, eine große Rolle spielt.

Der „von Neumann’sche Beweis“ versucht zu zeigen, dass eine deterministische Ergänzung der Quantentheorie prinzipiell ausgeschlossen ist. So meint Neumann:

„(...) Die Erklärung mittels der verborgenen Parameter hat in der klassischen Physik schon manches scheinbar statistisches Verhalten auf die kausale Grundlage der Mechanik zurückgeführt (z.b.: die kinetische Gastheorie). (...) Sie würde, wenn sie berechtigt wäre, die heutige Form der Theorie zu einem Provisorium stempeln, (...) Wir werden später zeigen, dass eine Einführung von verborgenen Parametern gewiss nicht möglich ist, ohne die gegenwärtige Theorie wesentlich zu ändern. (...) Es handelt sich also gar nicht, wie vielfach angenommen wird, um eine Interpretationsfrage der Quantenmechanik, vielmehr müsste dieselbe falsch sein, damit ein anderes Verhalten der Elementarprozesse als das statistische möglich wird.“ [Neumann, 1932, S. 108, 170, 171]

Für lange Zeit schien damit das endgültige Ende des Determinismus gekommen zu sein, bis David Bohm im Jahre 1951 einen „Vorschlag einer Deutung der Quantentheorie durch verborgene Variable“ [Bohm, 1952] vornahm. Aber erst John Bell konnte im Jahre 1966 mit seinem Werk „Über das Problem verborgener Variabler in der Quantentheorie“ [Bell, 1966] die konkrete Annahme aufzeigen, die

in von Neumanns Beweisgang eingegangen war, aber nicht notwendig in einer Theorie verborgener Variabler gültig sein muss.

Einstein – Podolsky – Rosen - Bohr

Die Kopenhagener Deutung spricht sich für eine indeterministischen Interpretation der Quantenmechanik aus, in der nur Wahrscheinlichkeitsangaben von Teilcheneigenschaften gegeben werden können. Diese Anschauung wird durch Neumanns Beweis gestärkt.

Bohr geht auf diesen Beweis nicht ein, genauso wenig wie Albert Einstein. Einstein -sehr unzufrieden mit der Kopenhagener Deutung- kritisiert die Anschauung Heisenbergs und möchte zeigen, dass Ort und Impuls eines Teilchens zu jedem Zeitpunkt einen festen Wert besitzen und nicht erst durch den Messprozess festgelegt werden. Da aber gemäß der Kopenhagener Interpretation Ort und Impuls ohne eine entsprechende Messung sich in einer Überlagerung befinden bzw. gar nicht existieren, schließt Einstein, dass die Quantentheorie eine *unvollständige* Beschreibung der Natur sein muss. Einstein meint:

„Der Gedanke, dass ein einem Strahl ausgesetztes Elektron aus freiem Entschluss den Augenblick und die Richtung wählt, in der es fortspringen will, ist mir unerträglich. Wenn schon, dann möchte ich lieber Schuster oder gar Angestellter in einer Spielbank sein als Physiker“. [Rowohlt, 1969, S.67]

Heisenberg berichtet in seinem Buch „Die physikalischen Prinzipien der Quantentheorie“ über ein Gedankenexperiment von Einstein: Es wird ein einzelnes Lichtquant betrachtet, welches durch Spiegelung an einem Strahlteiler zu 50% entweder in dem einen oder in dem anderen Teil des Wellenpaketes, dem reflektierten oder transmittierten, zu finden ist. Wird nun durch ein Experiment festgestellt, dass sich das Lichtquant in dem einen Teil befindet, wird die Wahrscheinlichkeit, das Lichtquant im anderen Teil zu finden, gleich null. Durch dieses Experiment wird quasi eine Art Wirkung (Reduktion der Wellenpakete) ausgeübt, die sich mit Überlichtgeschwindigkeit ausbreitet. Man erkennt auch, dass solche Wirkungsausbreitungen nicht dazu benutzt werden, um etwa Signale (Informationen) mit Überlichtgeschwindigkeit zu befördern. Das hier besprochene Verhalten steht in keinem Widerspruch zu den Grundpostulaten der Relativitätstheorie.

Es kann als Vorläufer des berühmten Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxon betrachtet werden. 1935 erschien von diesen dreien eine Arbeit mit dem Titel: „Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?“ [Einstein et. al., 1935] mit den anfänglichen Definitionen:

Vollständigkeit einer Theorie: Jedes Element der physikalischen Realität muss seine Entsprechung haben.

Element der physikalischen Realität: Eine hinreichende Bedingung für die Realität einer physikalischen Größe ist die Möglichkeit, sie mit Sicherheit vorherzusagen, ohne das System zu stören.

Am Beispiel eines Systems, das in zwei Teilchen zerfällt, wird dann gezeigt, dass man den Impuls von Teilchen A ohne jede Störung bestimmen kann, indem man den Impuls von Teilchen B misst. Dem Impuls von Teilchen A muss deshalb nach dem Realitätskriterium ein Element der physikalischen Wirklichkeit entsprechen. Da es in der Quantentheorie aber kein entsprechendes Element (also keine Variable, die den Ausgang der konkreten Messung widerspiegelt) gibt, schließen die Autoren, dass die Quantentheorie eine unvollständige Beschreibung der physikalischen Wirklichkeit darstellt.

Interessant ist, dass der Neumann'sche Beweis drei Jahre zuvor entstanden war, die drei Autoren allerdings nicht darauf eingingen, meinten aber: „Während wir somit gezeigt haben, dass die Wellenfunktion keine vollständige Beschreibung der physikalischen Realität liefert, lassen wir die Frage offen, ob eine solche Beschreibung existiert oder nicht. Wir glauben jedoch, dass eine solche Theorie möglich ist.“ [Einstein et. al., 1935]

Auch Bohrs Antwort auf das EPR-Paradoxon geht nicht auf den Neumann'schen Beweis ein. Dies hätte auch seiner Grundhaltung widersprochen, die im Komplementaritätsgedanken den wesentlichen Zug der Quantenmechanik sieht und jede Formalisierung des Messprozesses ablehnt. Seiner Meinung nach ist die klassische Physik der Quantenmechanik logisch vorausgesetzt, da die Versuchsanordnungen und die Messdaten nur in klassischen Termen beschreibbar sind und somit jede Formalisierung des Messprozesses auf einen logischen Zirkel führen würde.

Bohr meinte zum EPR-Paradoxon: Der Komplementaritätsgedanke fordert, dass in die „Beschreibung auch die mit den Objekten in Wechselwirkung stehenden

Messgeräte als wesentliches Glied eingehen". Ob dem Impuls oder der Koordinate des Teilchens A „physikalische Realität“ zuzumessen ist, hängt davon ab, welches der beiden einander ausschließenden Experimente durchgeführt wird. Da die gleichzeitige Durchführung beider Experimente unmöglich ist, macht es auch keinen Sinn, zu sagen, dass sowohl Impuls als auch Koordinate des Teilchens A „physikalische Realität“ aufweisen.

Darauf setzten zahlreiche Diskussionen ein, die erst mit den Bell'schen Ungleichungen wieder auf experimentelles Niveau zurückgeführt werden konnten.

Schrödinger

Da nun Heisenberg und Bohr ihre Anschauungen weiter ausgebaut haben, die Neumann unterstützte und Einstein kritisiert, meldet sich Schrödinger wieder zu Wort und formuliert mit „Die gegenwärtige Situation der Quantenmechanik“ seine Meinung zur Entwicklung der Quantenmechanik. Er zeigt sich enttäuscht, dass die Wellenmechanik nicht die Zielsetzung erreicht hat, die ihm anfänglich vorgeschwebt ist, nämlich ein kontinuierliches, klassisches-anschauliches Wellenbild der Mikrophänomene. Schrödinger kritisiert Neumanns Anschauung, der dem menschlichen Bewusstsein die Reduktion des Wellenpaketes zuschreibt. Er kann sich dieser Meinung nicht anschließen und hält an der Anschauung fest, dass der Zustand des Messobjekts vor der Messung schon feststeht. Er möchte der Bedeutung des Messprozesses das Gewicht nehmen und spielt mit dem Gedanken einer Ensembledeutung der Quantenmechanik, um der Überlagerung der Zustände, wie sie in der Unschärferelation beschrieben ist, zu entgehen. Dazu bringt er das Beispiel einer Katze (Schrödingers Katze), die in dem Zustand existiert, der gleichzeitig als *lebend* und *tot* beschrieben werden kann, also einer Überlagerung.

Die Quantenmechanik, so Schrödinger, kann nicht etwa als eine Aussage über ein klassisches Ensemble von Systemen mit verschiedenen Eigenschaften aufgefasst werden. Im Grundzustand des harmonischen Oszillators müsste es dann nämlich beispielsweise Teilchen mit imaginären Geschwindigkeiten geben, nämlich diejenigen mit großem Abstand zum Ursprung, denn dort tunnelt die Welle ins Potential hinein.

Für makroskopische Systeme muss aber eine derartige Ensembledeutung zutreffen, wie Schrödinger an einem „burlesken Fall“ zeigt, eben Schrödingers

Katze. Sie dient als Messapparat A , der den Zerfall eines quantenmechanischen Systems S , nämlich eines Atoms, durch die beiden Zeigerstellungen „tot“ und „lebendig“ angibt. Die Wahrscheinlichkeit jeder dieser „Zeigerstellungen“ folgt aus der Born'schen Interpretation, die auf den Endzustand angewendet wird.

Nach der Quantenmechanik müsste die Katze in einer Superposition ihrer beiden „Zeigerstellungen“ verharren, solange sie nicht beobachtet wird. Das lehnt aber Schrödinger ab, da die Beobachtung seiner Meinung nach ein rein geistiger Akt ist, der keinen wesentlichen physikalischen Einfluss auf A hat. Damit nimmt er die Meinung Neumanns nicht an. Die Reduktion des Wellenpaketes von A , die mit der Wahrnehmung verbunden ist, bedeutet demnach einfach, dass die Information über den bereits zuvor existierenden Zustand von (S plus A) vom Beobachter zur Kenntnis genommen wurde. Die Wellenfunktion von (S plus A) sollte demnach ein Ensemble von Systemen mit unterschiedlichen Eigenschaften beschreiben.

Da es aber keine eindeutige Trennung zwischen mikroskopischen und makroskopischen Observablen gibt, kommt Schrödinger wieder auf das ursprüngliche Dilemma der Quantenmechanik zurück, das eine erkenntnistheoretische Lösung fordert. Die Möglichkeit objektiver Aussagen über die Natur muss verneint werden.

Indem Schrödinger dabei jeden physikalischen Einfluss des menschlichen Beobachters auf den makroskopischen Zeiger „Katze“ ausschließt, steht er im Widerspruch zu Neumanns Meinung. Genau der gleiche Grund – nämlich die Interferenzterme –, welcher beim Doppelspaltversuch den Durchgang des Teilchens durch einen wohldefinierten Spalt ausschließt, verhindert nach Neumann nämlich auch eine wohldefinierte Zeigerstellung im vorliegenden Experiment, bevor diese von einem Beobachter bewusst zur Kenntnis genommen wurde. Schrödinger meinte außerdem:

„Die abrupte Veränderung (der ψ -Funktion) (...) ist der interessanteste Punkt der ganzen Theorie. Er ist genau der Punkt, der den Bruch mit dem naiven Realismus verlangt.“ [19] Während der Messung ist das System S in enger Wechselwirkung mit dem Messapparat A , so dass die Wellenfunktion von S für sich allein genommen zu bestehen aufhört. Deshalb „wäre es nicht ganz richtig, zu sagen, dass die ψ -Funktion des Objekts, die sich *sonst* nach einer partiellen Differentialgleichung, unabhängig vom Beobachter verändert *jetzt* infolge eines mentalen Aktes

sprunghaft wechselt. Denn sie war verlorengegangen, es gab sie nicht mehr. Was nicht ist, kann sich auch nicht verändern." [Schrödinger, 1935]

Erst nach der Messung, wenn (und falls) sich S vom Messapparat A wieder getrennt hat, gibt es wieder eine ψ -Funktion des quantenmechanischen Systems. Im Vergleich der Wellenfunktion vor der Messung scheint sie sich sprunghaft geändert zu haben. Diese „Reduktion des Wellenpaketes“ zeigt jedoch, dass „in Wahrheit ein wichtiges Geschehen dazwischen liegt, nämlich die Einwirkung der zwei Körper aufeinander, während welcher das Objekt keinen privaten Erwartungskatalog (eigene Wellenfunktion) besaß und auch keinen Anspruch darauf hatte, weil es nicht selbstständig war.“ [Schrödinger, 1935]

Omeljanowski - Fock

Die Kopenhagener Deutung geht davon aus, dass Ort und Impuls nicht gleichzeitig beliebig genau existieren und die einzelnen Zustände sich in einer Überlagerung befinden. Diese Ansicht weist dem Messprozess eine tragende Rolle zu, da jener den Zustand festlegt, in dem sich das Teilchen befindet.

Einstein hingegen versucht mit dem EPR-Paradoxon zu zeigen, dass diese nicht deterministische Anschauung nicht korrekt ist.

Schrödinger versucht ebenfalls die Kopenhagener Deutung als absurd darzustellen – mit Hilfe des berühmten Gedankenexperimentes: Schrödingers Katze. Er macht sich Gedanken zu einer möglich Ensembledeutung und kommt zu dem Schluss, dass jene im mikroskopischen Bereich nicht zutreffen kann.

Nun wird die Anschauung von Michail Erasmowitsch Omeljanowski betrachten. Er versucht, die von Einstein vorgeschlagene Ensemble-Interpretation auszubauen. Er möchte eine Interpretation schaffen, die mit Lenins Philosophie vereinbar ist und der Materie einen objektiven Charakter zuweist, unabhängig von einem menschlichen Beobachter. Diese Anschauung wird von Vladimir Fock kritisiert, der diese Interpretation völlig ablehnt.

Heisenbergs Feststellung: „Der Ort des Elektrons entsteht erst, indem wir ihn beobachten“ steht im Widerspruch zu Lenins kategorische Festlegung:

„Die einzige Eigenschaft der Materie, an deren Anerkennung der philosophische Materialismus gebunden ist, ist die Eigenschaft, objektive Realität zu sein, die außerhalb unseres Bewusstseins existiert.“ [Lenin, 1949, S.247]

M. E. Omeljanowski „Philosophische Probleme der Quantenmechanik“ biete eine entsprechende Deutung des Dualismus Teilchen-Welle an, die die Kopenhagener Deutung überwinden soll:

„Obwohl Bohr in der Arbeit ‚Quantenphysik und Philosophie‘ den objektiven Charakter der quantenmechanischen Beschreibung betont, betrachtet er die atomaren Objekte doch nicht unter dem Aspekt des von ihrer Natur untrennbaren Widerspruchs zwischen Korpuskel- und Welleneigenschaften. Die wahre Lösung - wenn man sich der Worte Hegels bedient- der Antinomie¹ der Komplementarität besteht darin, dass die Korpuskel- und Welleneigenschaften eines atomaren Objektes als einheitlicher Widerspruch angesehen werden. Gerade deshalb müssen die Quantenbegriffe, die diese dualistische Natur der atomaren Objekte widerspiegeln, qualitativ von den klassischen Begriffen unterscheiden.“
[Omeljanowski, 1926, S. 241]

Auch die Wellenfunktion selbst erfährt eine neue Deutung. Die „statistische Interpretation“ der Quantenmechanik stammt nicht aus dem Umfeld des Marxismus, sondern wurde 1927 von Einstein vorgeschlagen.

In der statistischen Deutung beschreibt die Wellenfunktion nicht ein einziges Teilchen, sondern ein Ensemble. Also sei die Quantenmechanik keine Erweiterung der klassischen Mechanik, sondern eher der statistischen Mechanik.

Einstein meinte dazu:

„Die Psi-Funktion beschreibt überhaupt nicht einen Zustand, der einem einzelnen System zukommen könnte; sie bezieht sich vielmehr auf so viele Systeme, eine ‚System-Gesamtheit‘ im Sinne der statistischen Mechanik.“ [Einstein, 1979, S. 97].

Auch andere Physiker schlossen sich dieser Meinung an z. b.: Dimitrie Blochinzew, Günther Ludwig, John Slater, Edwin Campell und L. E. Ballentine. Für marxistische Interpreten der Quantenmechanik war eine akzeptable Alternative zur Kopenhagener Deutung gefunden. M. E. Omeljanowski schreibt:

„Die Wellenfunktion bezieht sich in Wirklichkeit auf ein Quantenensemble. Letzteres existiert ebenso wie auch das klassische Ensemble unabhängig von der

¹ *Antinomie*: Unvereinbarkeit von Gesetzen – spezielle Art des logischen Widerspruchs, bei der die zueinander in Widerspruch stehenden Aussagen gleichermaßen gut begründet oder bewiesen sind. Ein logischer Widerspruch in einer Theorie wirkt verheerend, denn aus zwei widersprüchliche Aussagen folgt eine beliebige Aussage, d. h. aus solcher einer Theorie folgt Beliebiges, Alles und Nichts. [Wikipedia, 2020]

Messung: Unabhängig davon, ob die Erscheinungen, aus denen wir Schlussfolgerungen über Größen ziehen, die die aus einer Elektronenquelle emittierten Elektronen charakterisieren, registriert oder nicht registriert werden (d.h., ob die Werte, die dem entsprechenden Quantenensemble eigen sind, gemessen oder nicht gemessen werden), existieren die Erscheinungen gemeinsam mit den sie hervorrufenden Elektronen. Die Besonderheit des Quantenensembles im Unterschied zum klassischen Ensemble werden durch die untrennbaren Korpuskel-Wellen-Eigenschaften der Mikroobjekte verursacht, aus denen dieses Ensemble gebildet wird". [Omeljanowski, 1926, S. 51]

Am Beispiel der Beugung am Spalt können die unterschiedlichen Deutungen betrachten werden. Die Wellenfunktion ($|\psi|^2$) gibt die Verteilung der Elektronen nach der Beugung an.

Kopenhagen: Wird ein einzelnes Teilchen an einem bestimmten Ort beobachtet, so „reduziert sich“ die Wellenfunktion und wird dadurch den neu gewonnen *Kenntnissen* über dieses Einzelteilchen gerecht. Gerade darin liegt ein mögliches subjektives Element.

Statistische Deutung: Die Wellenfunktion beschreibt nicht ein einzelnes Teilchen, sondern das Verhalten eines gesamten Ensembles. Denn nur mit Hilfe einer großen Anzahl von Elektronen sind die Aussagen der Quantentheorie bezüglich der Verteilung der Teilchen überhaupt zu überprüfen, unabhängig davon, wie viele Teilchen gleichzeitig durch den Spalt treten. Wird nun ein Teilchen an einem bestimmten Ort vorgefunden, so verändert sich dadurch die Wellenfunktion nicht (*keine Reduktion der Wellenfunktion*), da ja das Ensemble, dem das Elektron angehört, unverändert geblieben ist.

Kritik kam auch innerhalb des dialektischen Materialismus gegen diese statistische Deutung der Quantenmechanik auf. Vladimir Fock, der als großer russischer Physiker gilt und viel zur Durchsetzung der Relativitäts- und der Quantentheorie in der Sowjetunion beigetragen hat, schrieb:

„Welche Elementen folge darf man nun in der Quantenmechanik als ein statistisches Kollektiv ansehen? Es muss eine Folge von *klassisch beschriebenen Elementen* sein, denn nur solchen Elementen kann man unter allen Umständen bestimmte Werte der zur Sortierung dienenden Parameter zuschreiben. Aus diesem Grunde kann ein Quantenobjekt nicht Element eines statistischen

Kollektivs sein, und zwar auch dann nicht, wenn man ihm eine bestimmte Wellenfunktion zuschreiben kann. Von einem ‚mikromechanischen‘ oder einem ‚Elektronenkollektiv‘ ... kann also keine Rede sein.

Die in der Quantenmechanik betrachteten statistischen Kollektive haben als Element nicht die Mikroobjekte selbst, sondern die Resultate der an ihnen vorgenommenen Messungen, wobei eine bestimmte Messanordnung einem bestimmten Kollektiv entspricht. Da nun die aus einer Wellenfunktion für verschiedene Größen gewonnenen Wahrscheinlichkeitsverteilungen verschiedenen Messanordnungen entsprechen, so entsprechen sie auch verschiedenen Kollektiven. Die Wellenfunktion kann also ... unmöglich einem bestimmten Kollektiv entsprechen.“ [Fock, 1958, S.191]

Fock beeinflusste auch in mancher Hinsicht die Entwicklung der Kopenhagener Deutung.

Heisenberg - Bohr

Die Diskussionen 1926 und 1927 hatten Niels Bohr, Werner Heisenberg und die anderen Protagonisten der Quantentheorie in ihrer Jugend in Kopenhagen zusammengeführt. Schrödinger, der durch formale Analogien seine Gleichung fand, musste sich zu deren Interpretation eher tastend und auf Irrwegen vorarbeiten. Heisenberg hingegen und auch Bohr waren wesentlich durch erkenntnistheoretische Überlegungen geleitet.

Die Kopenhagener Deutung der Jahre 1926/27 waren nur der erste Ansatz. Die Meinung der Beteiligten veränderte sich im Laufe der Zeit. Heisenberg kritisiert besonders ausführlich und negativ Bohrs Entdeckung der prinzipiellen Möglichkeit verborgener Parameter. Er bezeichnet sie als „ideologischen Überbau“, der mit der unmittelbaren physikalischen Realität nur noch wenig zu tun hat. Gegenüber marxistischen Kritikern betont Heisenberg die Rolle der Alltagssprache, die zur Formulierung der Messergebnisse erforderlich ist:

„Die Registrierung, d. h. der Übergang vom Möglichen zum Faktischen, ist hier unbedingt erforderlich, und kann aus der Deutung der Quantentheorie nicht weggelassen werden“. [Heisenberg, 1956, S.289]

Dann spricht er von dem oft geäußerten Vorwurf „dass die Quantentheorie die Existenz einer objektiv-realen Welt leugnet, die Welt also (unter Missverständnis

der Ansätze der idealistischen Philosophie) in irgendeiner Weise als Sinnentzug erscheinen lassen könnte". [Heisenberg, 1956, S.293]

Heisenberg erklärt den Messprozess folgendermaßen: Während das zu beobachtende System vor der Messung in einem wohldefinierten Zustand ist, befindet sich der Rest der Welt in einem Gemenge von Zuständen. Das ist eine Folge unserer unvollkommenen Kenntnis der Welt. Bei der Ankopplung des Systems an den Messapparat wird die Ungenauigkeit des Zustandes der Außenwelt auf das System übertragen; der Zustand des Systems geht dadurch in ein Gemenge von Zuständen über, die zu den verschiedenen möglichen Ergebnissen der Messung gehören. Die Zustandsreduktion ist nichts anderes als die Feststellung durch den Beobachter, welcher Zustand aus dem Gemenge wirklich vorliegt. – Diese Auffassung des Messprozesses wurde schon 1932 durch Neumann in seinem Buch „Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik“ [Neumann, 1932, S. 233] widerlegt.

Bei Bohr im Jahre 1955 wird besonders deutlich, welche Wandlung die Kopenhagener Deutung durchwandert hat. Im grundlegenden Referat „Das Quantenpostulat und die neuere Entwicklung der Atomistik“ schrieb er:

„Nach der Quantentheorie kommt eben wegen der nicht zu vernachlässigenden Wechselwirkung mit dem Meßmittel bei jeder Beobachtung ein ganz neues unkontrollierbares Element hinzu“ [Bohr, 1928, S. 245]

Zu einem späteren Zeitpunkt meint er („Die Entwicklung der Deutung der Quantentheorie“):

„(...) im besonderen ist der Gebrauch von Wendungen wie „Störungen der Phänomene durch Beobachtung“ oder „den atomaren Objekten durch Messungen physikalische Attribute beilegen“ kaum vereinbar mit der Umgangssprache und praktischen Definition“

des Weiteren meint er:

„ (...) dass in keinem Fall die geeignete Ausweitung unseres begrifflichen Rahmens eine Berufung auf das beobachtende Subjekt in sich schließt, was eine eindeutige Mitteilung von Erfahrungen verhindern würde“. [Bohr, 1928, S. 160 - 161]

De Broglie – Bohm – Bell – Einstein

Mit der Kopenhagener-Deutung liegt eine indeterministische Interpretation vor, die von Einstein und Schrödinger abgelehnt wird. Sie versuchen zu zeigen, dass die Kopenhagener Interpretation nicht das Naturphänomen der Quantenmechanik korrekt und vollständig beschreibt. Weder Einstein noch Schrödinger haben eine alternative Interpretation vorgelegt, die die Quantenphänomene in einer deterministischen Weise beschreiben lässt.

De Broglie und nachfolgend David Bohm konnten eine Beschreibung ausarbeiten, in der die Quanten-Welt mit Hilfe verborgener Variablen wieder deterministisch ist.

Laut der **Kopenhagener Deutung** beschreibt die Quantentheorie die Natur vollständig. Wenn die Wellenfunktion den Ort des Teilchens nicht festlegt, dann hat das Teilchen tatsächlich keinen bestimmten Ort. Dadurch werden beispielsweise begriffliche Schwierigkeiten bei der Deutung des Doppelspaltexperimentes vermieden.

Louis de Broglie [de Broglie, 1928] entwickelte die Theorie der Führungswellen. Nach dieser Theorie ist ein Teilchen immer lokalisiert, aber in eine Führungswelle eingebettet, deren Wellenfunktion ψ der Schrödingergleichung genügt. Sie beschreibt das Strömen einer Dichte $|\psi|^2$ durch den Raum, und zu jedem ψ gehört also ein Strömungsfeld oder Geschwindigkeitsfeld. Die obige Dichte beschreibt nach den Vorstellungen de Broglies auch die Verteilung der Teilchenorte in einem Ensemble von Teilchen, die zur gleichen Schrödingerfunktion gehören. Die Teilchen bewegen sich so, als würden sie von der Strömung mitgenommen.

Auch die Theorie der Führungswellen vermag das Doppelspaltexperiment in zwangloser Weise zu erklären. Das Teilchen geht nur durch einen Spalt, aber seine Bahn ist durch eine Wellenfunktion bestimmt, die auch vom zweiten Spalt abhängt.

Ganz allgemein kann man aber zeigen, dass die Strömungsgeschwindigkeit für jede reelle Wellenfunktion verschwindet. Demnach würde ein freies Teilchen zwischen ebenen Wänden ebenso in Ruhe verharren wie ein Elektron im Grundzustand des Wasserstoffatoms. Dies schien im Widerspruch mit der Impulsverteilung der Elektronen zu stehen, die man beispielsweise durch Comptonstreuung –an der Verbreiterung der Spektrallinien– ablesen kann. Diese Schwierigkeit veranlasste de Broglie, seine Theorie nicht weiter zu verfolgen.

David Bohm griff die Theorie 1951 wieder auf, zunächst ohne Kenntnis der Vorarbeit de Broglies. Das Buch: „Quantum Theory“ [Bohm, 1982] enthält eine sorgfältige physikalische und mathematische Analyse des Messprozesses. Bohm übertrug diese Analyse Punkt für Punkt auf die Theorie der Führungswelle und konnte zeigen, dass alle beobachtbaren Eigenschaften seiner Theorie mit der Quantenmechanik übereinstimmen. Des Weiteren zeigte er, dass bei einer Impulsmessung erst der Einfluss der Schrödingerfunktion des Messapparats die quantenmechanische Impulsverteilung erzeugt. Damit war das entscheidende Hindernis für de Broglies Theorie gefallen.

Mit dem Vorliegen eines deterministischen Modells der Quantenmechanik war die Zeit für eine neue Beurteilung des berühmten Beweises von Neumanns, dass solche Modelle prinzipiell unmöglich seien, gekommen. Bohm glaubte den Schwachpunkt gefunden zu haben: Neumann habe nicht in Betracht gezogen, dass das Messergebnis auch von den verborgenen Variablen des Messgerätes abhängen kann. Das war aber nicht das Problem des Beweises, wie sich später zeigte.

Erst die Analyse des Neumann'schen Beweis von John S. Bell [Bell, 1966] schuf Klarheit. Bell zeigte, dass es die Annahme einer speziellen (und unmöglichen) Beziehung zwischen den Ergebnissen unverträglicher Messungen ist, die die verborgenen Variablen ausschließt.

Das Modell von de Broglie und Bohm hat bemerkenswerte Vorzüge. Es erlaubt uns wieder die Vorstellung eines streng deterministischen Naturgeschehens, und es ist frei von jeder Problematik der Interpretation.

Einstein kritisiert das Bohm'sche Modell, welches gemäß Bell *nicht lokal* ist und somit dem Grundsatz von „Lokalität“ oder „Separabilität“ widerspricht. Einstein schreibt dazu in dem 1948 veröffentlichte Aufsatz: „Quanten-Mechanik und Wirklichkeit“ [Einstein, 1948]

„(...) Zu einer bestimmten Zeit beanspruchen diese Dinge eine voneinander unabhängige Existenz, soweit diese Dinge ,in verschiedenen Teilen des Raumes liegen'. Ohne die Annahme einer solchen Unabhängigkeit (Alltagsdenken) wäre physikalisches Denken in dem uns geläufigen Sinn nicht möglich. Ohne solche saubere Sonderung wäre es nicht sichtbar wie man physikalische Gesetze formulieren und prüfen kann. Die Feldtheorie hat dieses Prinzip bis zum Extrem durchgeführt, indem sie die ihr zugrunde gelegten voneinander unabhängig

existierenden elementaren Dinge sowie die für sie postulierten Elementargesetze in den unendlich-kleinen Raum-Elementen (vierdimensional) lokalisiert. Eine äußere Beeinflussung von A hat keinen unmittelbaren Einfluss auf B ; dies ist als ‚Prinzip der Nahewirkung‘ bekannt, welches nur in der Feld-Theorie konsequent angewendet ist. Völlige Aufhebung dieses Grundsatzes würde die Idee von der Existenz (quasi-) abgeschlossener Systeme und damit die Aufstellung empirisch prüfbarer Gesetze in dem uns geläufigen Sinne unmöglich machen.“ [Einstein, 1948, S. 320]

Bell

Das indeterministische Modell Kopenhagens und die deterministische Interpretation von Bohm beschreiben beide die Phänomene der Quantenwelt, aber mittels einer unterschiedlichen theoretischen Beschreibung und Interpretation. Einstein setzt sich für eine deterministische und lokale Lösung ein. John Bell geht von einer *lokal, realistische* Lösung aus, wie sie Einstein vorschwebt, und kann zeigen, dass dieser Ansatz den Quantenphänomenen widerspricht. Er zeigt, dass die Quantentheorie entweder *nicht-lokal, realistisch* (Bohm) oder *nicht-lokal, nicht-realistisch* (Kopenhagen) oder *lokal, nicht-realistisch* sein muss.

Bell [Bell, 1966] bemerkte im Aufsatz über den Neumann'schen Beweis, dass die Theorie von Bohm nicht lokal ist.

Zwei Systeme, deren Schrödingerfunktion infolge einer früheren Wechselwirkung nicht in ein Produkt zweier Wellenfunktionen zerfällt, sind nicht separierbar. Es bleibt ein dauernder kausaler Einfluss jedes Teilsystems auf die weitere Entwicklung bestehen.

Bell gelang der Beweis, dass die Nichtseparierbarkeit räumlich getrennter Systeme eine Eigenschaft der Quantenmechanik selbst ist, und die Teilchen miteinander verschränkt sind. Das bedeutet, dass die Quantenmechanik *nicht lokal* oder *nicht realistisch* oder sogar beides ist.

Everett - Wheeler

Als letztes wird noch eine Interpretation betrachtet, die keine Reduktion der Wellenfunktion beinhaltet, sondern stattdessen eine „Aufspaltung“ des Zustandes der gesamten Welt. Befindet sich Ort und Impuls eines Quantenobjekts vor der Messung gemäß der Kopenhagener Interpretation in einer Überlagerung, so befindet sich hier die ganze Welt in einem nicht eindeutigen klassischen Zustand.

Diese Interpretation steht im Widerspruch zu der Neumann'schen Theorie, die einen Beobachter von außen benötigt.

Die Schrödingerfunktion des Universums als Ganzes wurde erstmals 1957 von Everett und Wheeler zum Gegenstand theoretischen Überlegungen. Heisenberg war nicht einverstanden mit dieser Idee und schrieb in „Die physikalischen Prinzipien der Quantentheorie“ [Heisenberg, 1955]:

„Schließlich könnte man die Kette von Ursache und Wirkung nur dann quantitativ verfolgen, wenn man das ganze Universum in das System einbezüge – dann ist aber die Physik verschwunden und nur ein mathematisches Schema geblieben.“

Everett und Wheeler nahmen den Quantenzustand des Universums ernst. Sie wollten damit Vorarbeit für eine künftige Quantentheorie der Gravitation oder der Kosmologie leisten.

Das Problem, das sie lösen wollten, war eine Interpretation einer Wellenfunktion ohne einen Beobachter außerhalb des Systems. Es wird davon ausgegangen, dass jede vollzogene Messung zu einer Aufspaltung der Wellenfunktion des Systems (*Messobjekt + Messapparat*) in mehrere Komponenten führt. Jede Komponente gehört zu einer möglichen Zeigerdarstellung des Messapparats.

Wenn der Messapparat klassische Eigenschaften hat, sind die Interferenzen zwischen den verschiedenen Komponenten so ungeheuer klein, dass sie praktisch völlig unbeobachtbar sind. Das weitere Schicksal jeder Komponente ist praktisch völlig unempfindlich gegen die Anwesenheit der anderen Komponenten. Aber erst eine nochmalige Beobachtung des Messgerätes von außen wählt eine Komponente als die wirkliche aus, sie *reduziert* den Zustand des Messgerätes.

Everett schlägt vor, dass, wenn schon die ganze Welt in das System einbezogen wird, gar keine Reduktion mehr gibt. Es gibt nach der Messung zwar immer noch eine einzige Welt, aber keinen eindeutigen klassischen Zustand der Welt. Der klassische Weltzustand verzweigt sich im Lauf der Zeit in Myriaden verschiedener Zustände. Alle diese Zustände existieren nebeneinander.

Ein Hauptziel der Everett'schen Theorie ist die Herleitung der Born'schen Deutung der Wellenfunktion. Sie soll nicht gesondert postuliert, sondern aus den anderen Axiomen der Quantenmechanik gewonnen werden, so dass sich die Theorie „selbst interpretiert“.

Das Everettsche Konzept ist begrifflich alles andere als klar. Das drückt sich sogar in der sprachlichen Formulierung aus: Man spricht von der „Many-World“ – Interpretation, obwohl Everett ausdrücklich eine Welt mit einem nicht eindeutigen klassischen Zustand postuliert. Aber wie soll man sich viele Zustände, die gleichzeitig existieren, anderes vorstellen als an ebenso vielen Systemen realisiert.

Problematisch ist auch die Erklärung der Born'schen Deutung. Da sich das Adjektiv „real“ nicht steigern lässt, sind Weltzweige mit sehr kleiner Amplitude genauso real wie diejenigen, deren Amplitude groß ist.

Die obigen Einsichten haben verhängnisvolle Konsequenzen für die Theorie des Messprozesses *Neumanns*. Wenn ein Objekt zum Zweck einer Messung an ein System mit makroskopischen Eigenschaften gekoppelt wird, ist dieses System notwendigerweise das ganze Universum. Aber auf das ganze Universum ist die Neumann'sche Theorie nicht anwendbar, denn sie bedarf eines menschlichen Beobachters außerhalb des Systems.

Wir kommen zu dem Schluss, dass die Theorie Neumanns nur anwendbar ist, wenn das System aus Objekten und Messgerät mikroskopisch ist. Sie ist –aus dynamischen Gründen- keine Theorie der makroskopischen Messung.

In der *Kopenhagener Deutung* wird nicht mit Wellenfunktionen makroskopischer Systeme operiert. Es wird vielmehr unterschieden zwischen den grob-sinnlich wahrnehmbaren Größen, die objektiv-real sind und klassisch beschrieben werden müssen, und den Atomen, die keine realen, sondern nur potentielle Eigenschaften haben. Die Frage ist, ob diese Unterscheidung haltbar ist.

3.2 Quantenmechanik im Schulunterricht

In diesem Kapitel werden österreichische Schulbücher herangezogen und auf ihren Aufbau bezüglich der Quantenmechanik betrachtet. Die Schulbücher können Aufschluss geben über eine mögliche Umsetzung des Themas im Schulunterricht. Teilweise wurden die österreichischen Schulbücher aus der Fachbereichsbibliothek Physik entlehnt, in einigen Fällen war auch ein Onlinezugriff möglich. Da im österreichischen Lehrplan die Erarbeitung der Quantenmechanik in der 7. Klasse stattfindet, sind die Bücher aus diesem Jahr zu betrachten. Zuerst werden die Kapitel in den Schulbüchern zum Thema Quantenmechanik kurz zusammengefasst. Anschließend werden die Schulbücher miteinander verglichen.

3.2.1 Verschiedene Schulbücher

Big Bang Physik 7 von Martin Apolin (öbv)

Dieses Buch richtet sich an Schülerinnen und Schüler der Oberstufe in der 7. Klasse und ist geeignet für die Oberstufe der allgemeinbildenden höheren Schulen im Unterrichtsgegenstand Physik (Lehrplan 2017)

In der Einführung zum Kapitel 33: „Welle und Teilchen“ (Apolin, 2018, p. 53) wird mit einem Beispiel begonnen, in dem man aufgefordert wird, sich vorzustellen, dass man mit einem Snowboard gleichzeitig links und rechts an einem Baum vorbeifahren könnte, was natürlich in der alltäglichen Welt unmöglich ist. Es wird der Begriff „Quanten“ eingeführt für kleinste Objekte wie Atome oder deren Bestandteile. Die Phänomene der Quantenmechanik werden als absurd bezeichnet und es wird darauf eingegangen, dass auch die allerschlauesten Physiker es schwer haben, sie sich bildlich vorzustellen. Es wird ein kleiner Ausblick hierauf gegeben und erwähnt, dass die Quantenmechanik sich nur mit Hilfe der Wahrscheinlichkeit berechnen lässt, was Einstein nicht akzeptieren wollte und sich zeit seines Lebens gegen den Wahrscheinlichkeitscharakter der Quantenmechanik aufgelehnt hat. Hier irrte er aber, da das Verhalten von Quanten immer dem Zufall unterliegt. Es folgen Zitate von Born und Feynman, welche ebenfalls ihre anfänglichen Schwierigkeiten mit quantenmechanischen Phänomenen zum Ausdruck bringen. Man kann sich die Quantenmechanik nicht bildlich vorstellen, aber man kann sie exakt berechnen. Mechanische oder thermische Phänomene kann man spüren, optische sehen und akustische hören, aber es gibt keinen „Quantensinn“, der uns Menschen die Phänomene der Quantenmechanik näherbringen könnte. Daher können wir uns keine konkreten Vorstellungen davon machen. Im ersten Kapitel wird damit begonnen, dass Quanten sowohl Teilchen- als auch Welleneigenschaften aufweisen. Diese Tatsache führt zu vielen Überraschungen, die die Quantenmechanik zu bieten hat.

Im Weiteren werden die Interferenz und Beugung von Wellen wiederholt. Konstruktive und destruktive Interferenz werden anhand der Beugung am Spalt besprochen und das Huygen'sche Prinzip wird aufgegriffen. Bevor das Doppelspalt-Experiment seinen Auftritt hat, wird ein kurzer historischer Abstecher in die Optik unternommen und über die Wellentheorie Huygens und die Teilchentheorie Newtons gesprochen. Die Teilchentheorie kann zur Erklärung des Doppelspalt-Experiments nicht herangezogen werden, jedoch kann die Wellentheorie mit Hilfe

der destruktiven Interferenz einen Lösungsansatz bieten. Dass Licht kontinuierlich ist, setzte sich im 19. Jahrhundert mehr und mehr durch. Mit der elektromagnetischen Theorie für Licht von Maxwell wurde diese Theorie untermauert. Nebenbei wird in einer Infobox ein Experiment besprochen: Die schillernde CD als Alltagsphänomen für die Beugung des Lichts. 1905 lieferte Albert Einstein mit der Erklärung für den Photoeffekt ein gewichtiges Argument für die Ansicht, dass Licht doch körnig sei. Es folgt eine Beschreibung des Photoeffekts und die Begriffe Lichtquanten bzw. Photonen werden eingeführt sowie der Rückgriff Einsteins zum Planck'schen Wirkungsquantum. Als Alltagsbezug zum Photoeffekt werden in einer Infobox die CCD und Digitalkamera angeführt, die kurz erklärt werden.

Es folgt eine Darstellung der damaligen neuen Erkenntnis, dass Licht sowohl Wellen- als auch Teilcheneigenschaften hat. Im Folgenden wird De Broglies Ansatz, dass diese Doppelnatur auch für andere Teilchen wie z.B. Elektronen und Neutronen gilt, beleuchtet. Der neue Begriff der Materiewellen wird eingeführt. Dazu kommt die Formel für die de Broglie-Wellenlänge. Es wird die Frage aufgeworfen, dass wenn man theoretisch jedem Objekt eine Wellenlänge zuordnen kann, warum dann keine Interferenzerscheinungen für alltägliche Objekte beobachtet werden können? Gibt es eine Grenze für die Beobachtung von Quanteninterferenzen? Wenn ja, wo liegt diese? Dazu werden in Infoboxen das Elektronenmikroskop und das Doppelspaltexperiment mit C_{60} Molekülen aus dem Jahre 1999 besprochen.

Anhand des Doppelspaltexperiments wird das Vorstellungsproblem der Quantenmechanik aufgerollt. Es wird beschrieben, was passiert, wenn man zum Beispiel Elektronen einzeln durch den Doppelspalt schickt. Das Interferenzmuster bleibt erhalten, obwohl man sich nicht vorstellen kann, wie sich ein Elektron durch beide Spalten bewegen und mit sich selbst interferieren sollte. Mit der Argumentation, dass man dieses Phänomen berechnen, aber sich nicht vorstellen kann, wird die Wahrscheinlichkeitswelle eingeführt und erwähnt, dass Schrödinger dazu eine passende mathematische Beschreibung lieferte. Daraufgehend wird der Wahrscheinlichkeits-Charakter des Interferenzmusters besprochen und deutlich gemacht, dass man zwar nicht vorhersagen kann, wo genau ein Elektron landen wird, sehr wohl aber jedem möglichen Landepunkt am Schirm eine Wahrscheinlichkeit zuordnen kann. Dieser Zufall ist es, den Einstein nicht

akzeptieren wollte und er hatte zeitlebens die Hoffnung, dass dieser Zufall nur scheinbar und auf die menschliche Unwissenheit zurückzuführen ist. Als Experiment wird in einer Infobox der Welcher-Weg-Detektor angegeben, der anzeigt, durch welchen Spalt das Elektron gegangen ist. Wäre diese Information in irgendeiner Form vorhanden, gäbe es auch kein Interferenzmuster mehr. Am Rande wird die Wellenfunktion erwähnt und ihre Abkürzung ψ . Die Wahrscheinlichkeitsdichte $|\psi|^2$ wird eingeführt und kurz erklärt.

Als Nächstes wird die Heisenbergsche Unschärferelation vorgestellt. Dazu wird der Determinismus erläutert und der Laplace'sche Dämon. Die Unschärfe wird eingeführt mit den Worten: „Es ist unmöglich, sowohl den exakten Ort als auch den exakten Impuls eines Teilchens gleichzeitig zu bestimmen.“ (Apolin, 2018, p. 63). Es folgt die Heisenbergsche Unschärferelation für Ort und Impuls: $\Delta p \cdot \Delta x \geq \frac{h}{4\pi} \approx \frac{h}{13}$. In weiterer Folge wird darauf hingedeutet, dass man die Ortsunschärfe oder die Impulsunschärfe verringern kann, aber niemals beides gleichzeitig. Darauf aufbauend ist auch der Bahnbegriff in der Quantenmechanik nicht mehr haltbar. Die Unschärfe liegt nicht an mangelhaften Messverfahren, sondern ist eine prinzipielle Eigenschaft der Natur selbst und gilt auch dann, wenn man keine Messung vornimmt. Am Rande wird in einer Infobox auf die Frequenzunschärfe eingegangen. Aus der Frequenz der Wellenfunktion für ein quantenmechanisches Objekt kann der Impuls abgeleitet werden. Stellt man sich eine Sinusfunktion vor, so hat diese weder einen Anfang noch ein Ende. Dementsprechend wäre der Ort maximal unscharf, wenn der Impuls genau beschrieben ist. Wenn man nun die Impulsunschärfe vergrößert und weitere Sinusfunktionen mit unterschiedlicher Frequenz addiert, dann kann die Ortsunschärfe verringert werden. Hier wird kurz die Fourier-Synthese vorgestellt. Ein weiterer Hinweis zielt auf die Folgen der Aufgabe des Bahnbegriffs ab, indem man angibt, wie genau die man die Vorhersagen für eine Sonde berechnen kann und was passieren würde, wenn man stattdessen ein Elektron losschicken würde. Wenn man den Ort des Elektrons bzw. den Schwerpunkt für die Sonde auf einen Millimeter genau bestimmen könnte, ergäbe dies für die Sonde eine zu vernachlässigende Impulsunschärfe, für das Elektron wäre das eine deutliche höhere Impulsunschärfe, die es praktisch unmöglich macht, den Weg für das Elektron vorherzusagen.

Physik 7 von Sexl (öbv)

Dieses Buch richtet sich an Schülerinnen und Schüler der 7. Klasse an einer allgemeinbildenden höheren Schule. Herangezogen wurde die 1. Auflage von 2018.

Das für diese Betrachtungen interessante Kapitel ist „Quanten und Atome“. Es beginnt mit der Überschrift: „Licht – Wandel des physikalischen Weltbildes“ (Sexl, et al., 2018, p. 83) und setzt mit der historischen Entwicklung zu Licht fort. Die Teilchentheorie Newtons und die Wellentheorie Huygens standen sich im 17. Jahrhundert gegenüber. Es folgt eine Beschreibung des Siegeszuges der Wellentheorie von Young über Maxwell bis hin Hertz, der gesagt haben soll: „Die Wellentheorie des Lichts ist, menschlich gesprochen, Gewissheit.“ (Sexl, et al., 2018, p. 83). Hertz machte im Jahr 1887 eine zufällige Entdeckung, die zu Experimenten führten, die zeigten, dass negativ geladene Metallplatten bei UV-Bestrahlung ihre negativen Ladungen verlieren. Elektronen werden dadurch freigesetzt. Es folgt eine Beschreibung des Photoeffekts und dass dieser nicht durch das Wellenmodell des Lichtes erklärt werden kann. Erst Einstein konnte mit Hilfe der Lichtquantenhypothese den Photoeffekt deuten. Es folgt eine Beschreibung der von Einstein gegebenen Darstellung seiner Idee. Die Formel für die Energie (E) eines Lichtquanten mit der Frequenz (f) wird gegeben: $E = h \cdot f$ mit dem Planck'schen Wirkungsquantum (h). Es wird auch die Formel von Einstein für die maximale kinetische Energie der Elektronen gegeben. Die historische Grundfrage der Quantenphysik, wie man den offensichtlichen Widerspruch zwischen den beiden Vorstellungen von Licht auflösen kann, wird gestellt. Bevor einige Experimente besprochen werden folgt die Definition des Elektronenvolts sowie eine Erklärung für den äußeren sowie inneren Photoeffekt und dem Röntgenspektrum. Der Impuls (p) von Photonen wird angesprochen und eine Formel gegeben: $p = \frac{E \cdot v}{c^2} = (h \cdot f) \frac{c}{c^2} = \frac{h \cdot f}{c} = \frac{h}{\lambda}$, mit der Energie (E), der Geschwindigkeit (v), der Frequenz (f), der Wellenlänge (λ) der Photonen; der Lichtgeschwindigkeit (c) und dem Planck'schen Wirkungsquantum (h). Der Strahlungsdruck und der Compton-Effekt werden hier auch vorgestellt.

Im nächsten Kapitel: „Lichtteilchen und Lichtwelle“ (Sexl, et al., 2018, p. 93) wird die Frage nach der Natur des Lichtes wieder aufgegriffen. Um sich dieser Fragestellung anzunähern, werden drei verschiedene Ansichten aufgezählt:

1. „Es gibt Widersprüche in der Natur. Die einander widersprechenden Wellen- und Teilcheneigenschaften sind Beispiele dafür.“ (Sexl, et al., 2018, p. 93)

2. „Teilchen und Welle sind verschiedene Modelle zur Beschreibung des Lichts. Je nach Experiment ist einmal das eine Modell und dann das andere zu bevorzugen. Zur Erklärung weiterer Experimente könnte es künftig notwendig werden, wiederum andere Modelle zu benützen.“ (Sexl, et al., 2018, p. 93)
3. „Es gibt eine umfassende Theorie, die das Verhalten von Licht korrekt beschreibt, d.h. es lassen sich aus ihr experimentell überprüfbare Vorhersagen über den Ausgang von Experimenten ableiten. Wir bilden jedoch unsere physikalischen Begriffe mit Hilfe der Erfahrungen des Alltags, in dem die Quantenphänomene nicht direkt wahrnehmbar sind. Daher ist unsere Sprache zur Beschreibung der Erscheinung im Mikrokosmos nur schlecht geeignet, weil wir einander scheinbar widersprechende, in Wahrheit aber ergänzende Begriffe (wie Welle und Teilchen) für Teilaspekte einer Erscheinung verwenden. Innerhalb der umfassenden Theorie müssen die Begriffe eine neue Bedeutung erhalten.“ (Sexl, et al., 2018, p. 93)

Es werden verschiedene Argumente angeführt. Der erste Standpunkt ist nicht haltbar, da es naheliegender ist, nach Widersprüchen in unserer Vorstellung zu suchen als in der Natur selbst. Der zweite Standpunkt würde ein Nebeneinander von Modellen bedeuten, die keine Beziehung zueinander haben. Das würde dazu führen, dass weitere Modelle entstehen könnten, um experimentelle Ergebnisse zu stützen. Es würde eine übergeordnete Theorie brauchen, aus der man auf verschiedenste experimentelle Befunde schließen kann. Es bleibt nur mehr der dritte Standpunkt. Als umfassende Theorie wird hier die Quantenelektrodynamik (QED) genannt.

Um die Körnigkeit von Licht deutlich zu machen, wird die zeitliche Entwicklung von Bildern betrachtet. Mit fortlaufender Belichtungszeit wird das Bild deutlicher.

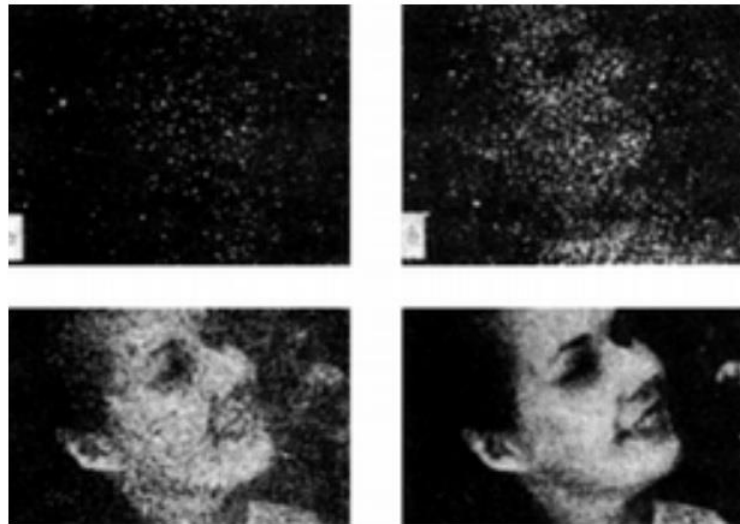


Abbildung 1: Die Körnigkeit des Bildes wird untermauert, indem die zeitliche Entwicklung einer unterbelichteten Fotografie gezeigt wird. Quelle: (Sexl, et al., 2018, p. 93)

Ausgehend von diesen Überlegungen wird die Beugung am Spalt näher betrachtet. Es wird die schrittweise Sichtbarkeit des Beugungsmusters am Schirm besprochen und der Zusammenhang zur Amplitude der Welle. Es wird festgestellt, dass die Dichte der Photonen proportional zum Quadrat der Amplitude der Lichtwelle ist. Wird das Experiment öfters wiederholt, zeigt sich, dass sich zeitlich die Entwicklung der Schwärzungspunkte ändert. Daher ist es nicht möglich vorherzusagen, wo genau die Lage der einzelnen Schwärzungspunkte sein werden. Wahrscheinlichkeitsaussagen sind jedoch möglich. Das führt zu dem nächsten Merksatz, der Born'schen Deutung, die besagt, dass das Quadrat der Amplitude einer Lichtwelle der Wahrscheinlichkeit proportional ist, Photonen in einem bestimmten Raumbereich anzutreffen. Hier wird oft von dem Welle-Teilchen-Dualismus gesprochen. Dieser Begriff ist jedoch nicht mehr zeitgemäß, da er den zweiten Standpunkt nahelegt, der jedoch nicht haltbar ist. Quantenobjekte wie z.B. Photonen, Elektronen, Atome und Moleküle, sind weder Teilchen noch Welle, sondern prinzipiell neuartige Objekte.

Im nächsten Kapitel wird auf die Hypothese von de Broglie eingegangen. Auch Elektronen sollen Welleneigenschaften haben und daher auch eine Wellenlänge sowie eine Frequenz. „Wenn ein Elektronenstrahl eine sehr kleine Öffnung durchquert, dann sollten Beugungserscheinungen auftreten.“ (Sexl, et al., 2018, p. 94). Aus den Zusammenhängen: $E = h \cdot f$ und $p = h/\lambda$ und daraus abgeleitet

$$E_{kin} = \frac{mv^2}{2} = \frac{p^2}{2m} = \frac{h^2}{2m\lambda^2} \text{ wird die de Broglie Wellenlänge eingeführt: } \lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE_{kin}}}, \text{ mit}$$

der Energie (E), dem Impuls (p), der Geschwindigkeit (v), der Masse (m), der Frequenz (f), der Wellenlänge (λ) der Teilchen und dem Planck'schen Wirkungsquantum (h).

Im nächsten Kapitel wird der Doppelspalt mit Elektronen genaustens besprochen. Zuallererst wird er mit klassischen Teilchen durchgeführt und es wird dargestellt, was mit den Verteilungen (W_1 bzw. W_2) passiert, wenn jeweils nur ein Spalt offen ist und wenn beide Spalten offen sind. Es wird deutlich, dass sich die Verteilungen (W_1 und W_2) addieren.

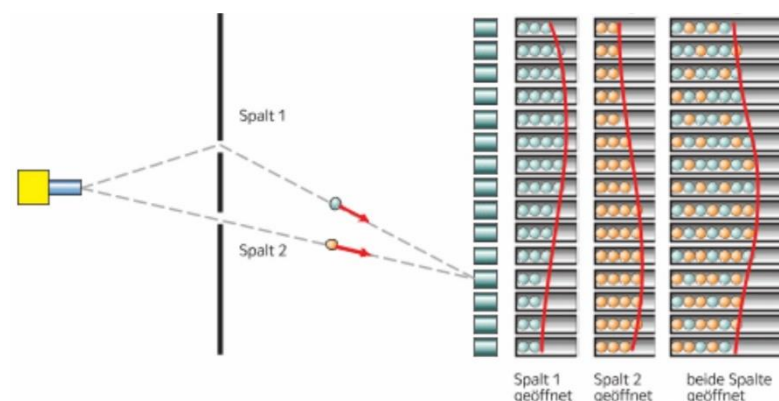


Abbildung 2: Doppelspaltversuch mit klassischen Teilchen Quelle: (Sexl, et al., 2018, p. 95)

Wenn man allerdings Quantenobjekte heranzieht, sieht die Verteilung, wenn man beide Spalte geöffnet hat, anders aus.

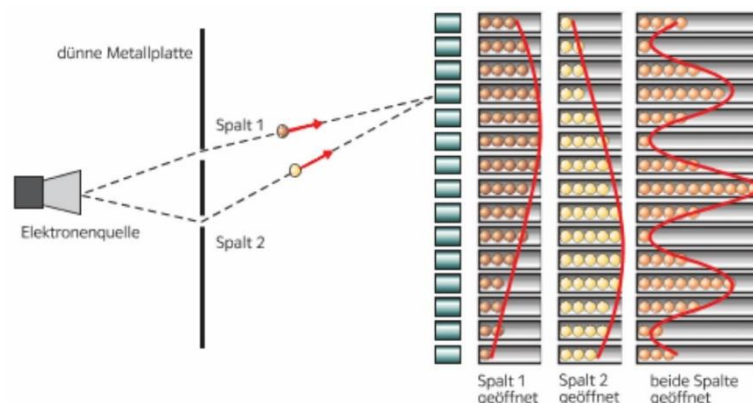


Abbildung 3: Doppelspaltversuch mit quantenmechanischen Objekten. Quelle: (Sexl, et al., 2018, p. 95)

Das typische Interferenzbild einer Welle am Doppelspalt wird sichtbar, wenn beide Spalten geöffnet werden. Hier addieren sich die Verteilungen nicht. Es folgt ein weiterer Merksatz: „Das Verhalten der Elektronen beim Durchgang durch einen engen Spalt wird durch eine Welle ψ beschrieben. Die Wahrscheinlichkeit W des Auftreffens eines Elektrons an einer bestimmten Stelle des Schirms wird durch das Quadrat der Amplitude dieser Welle ψ^2 bestimmt.“ (Sexl, et al., 2018, p. 96).

Das nächste Kapitel führt den Begriff Materiewelle ein und macht gleichzeitig darauf aufmerksam, dass dieser Begriff zu Missverständnissen führen kann, da er suggeriert, dass eine Wellenbewegung materieller Teilchen vorliegt. Die Wellenfunktion ψ wird als Wahrscheinlichkeitswelle dargestellt, deren Quadrat ψ^2 die Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Teilchen angibt. Nun wird die Frage aufgeworfen, wie das Interferenzbild zustande kommt. „Fliegen vielleicht halbe Elektronen durch die Spalte, um anschließend mit der anderen Hälfte zu interferieren?“ (Sexl, et al., 2018, p. 96). Wenn man misst, durch welchen Spalt die Elektronen gehen, verschwindet das Beugungsbild. Es folgt der nächste Merksatz: „Wenn man nicht entscheiden kann, durch welchen Spalt das Elektron gegangen ist, kann man nicht von einer „Bahn“ des Elektrons sprechen.“ (Sexl, et al., 2018, p. 96). Zum Abschluss wird darauf hingewiesen, dass die de Broglie-Beziehung für verschiedene Arten von Teilchen gilt. Atome und Moleküle weisen quantenmechanische Eigenschaften auf. Das aktuelle Forschungsgebiet, welches sich damit beschäftigt, wird Wellenoptik von Atom- und Molekülstrahlen genannt.

Im nächsten Kapitel wird die Heisenbergsche Unschärferelation behandelt. Es stellt sich die Frage, wie genau sich Teilchenbahnen festlegen lassen. Mit Hilfe einer Braun'schen Röhre kann ein Elektronenstrahl erzeugt werden, der einen Leuchtfleck am Bildschirm erzeugt. Es wird die Frage gestellt, wie sehr man den Blendendurchmesser verkleinern kann und der Leuchtfleck trotzdem noch scharf bleibt. Vergleiche mit einer Wasserwelle werden empfohlen und zeigen, dass wenn der Blendendurchmesser viel größer als die Wellenlänge ist, der Leuchtfleck scharf bleibt. Wenn die Blendenöffnung ähnlich groß wie die Wellenlänge ist, entstehen Beugungsphänomene. Die Elektronen laufen auseinander. Der nächste Merksatz lautet: „Teilchenbahnen können nur mit einer Genauigkeit von einigen de Broglie-Wellenlängen festgelegt werden.“ (Sexl, et al., 2018, p. 97). Je mehr der Blendendurchmesser verringert wird, desto genauer kann man sagen, von wo die Elektronen ausgehen, aber desto breiter wird das Beugungsbild. Um den Impuls

der Elektronen möglichst einheitlich zu gestalten, muss man den Elektronenstrahl breit machen, daher muss man automatisch auf eine genaue Kenntnis des Aufenthaltsortes der Elektronen verzichten. „Es ist unmöglich, einen Elektronenstrahl so zu erzeugen, dass gleichzeitig ein genau bestimmter Ort und eine genau bestimmte Geschwindigkeit der Elektronen gemessen werden können.“ (Sextl, et al., 2018, p. 98). Nun wird die Heisenbergsche Unschärferelation eingeführt. „Ort und Impuls können nicht gleichzeitig mit beliebiger Genauigkeit bestimmt werden. Für das Produkt aus Ortsunschärfe Δx und Impulsunschärfe Δp_x gilt $\Delta x \cdot \Delta p_x \approx h$.“ (Sextl, et al., 2018, p. 98). Durch die Heisenbergsche Unschärferelation ist die Idee der klassischen Mechanik, prinzipiell die Entwicklung von Ereignissen exakt vorhersagen zu können, nicht mehr haltbar. Es können nur Aussagen über das statistische Verhalten getroffen werden: „Über einzelne Quantenobjekte sind keine detaillierten Vorhersagen möglich. Die Heisenbergsche Unschärferelation schränkt die Berechenbarkeit des Ablaufes von Naturvorgängen ein.“ (Sextl, et al., 2018, p. 99). Da h sehr klein ist, kann man für makroskopische Objekte trotzdem noch von einer Bahn sprechen.

3.2.2 Vergleich der Schulbücher

Im Zuge der Einführung macht das Schulbuch Big Bang Physik 7 von Martin Apolin darauf aufmerksam, dass die Quantenmechanik etwas fundamental Neues darstellt und den Alltagserfahrungen widerspricht und dass sogar hochrangige Physiker es schwer haben, sich eine bildliche Vorstellung zu quantenmechanischen Phänomenen zu machen. Besonders interessant ist die Idee eines „Quantensinns“, dessen Nicht-Existenz es uns Menschen so schwer macht, die Quantenmechanik befriedigend zu beschreiben. Das Schulbuch „Physik 7“ von Sextl geht in der Einleitung zum Kapitel: „Licht – Wandel des physikalischen Weltbildes“ etwas anders vor und erklärt, was eine physikalische Theorie eigentlich ist, wie sie aus Teilgebieten der Physik entstehen und sich zu einer umfassenden Theorie entwickeln kann und wie sehr sich eine Theorie im Laufe der Zeit verändern kann bzw. wie eine Theorie von einer anderen neueren Theorie abgelöst werden kann. Die Gesamtheit aller Theorien bildet das Weltbild der Physik. Darauf folgt eine umfangreiche Darstellung der Entwicklung der Optik.

Die Einleitung des „Big Bang“-Schulbuches wirkt auf mich etwas lebendiger und mehr darauf ausgerichtet, möglichst viele Schülerinnen und Schüler zu erreichen, indem man mit einem absurden „Alltagsphänomen“ beginnt, welches das Nicht-

Vorhanden sein eines eindeutigen Weges auf die makroskopische Ebene mit Hilfe eines Snowboarders, verlegt. Auf diese Weise wird ein kognitiver Konflikt bei den Schülerinnen und Schüler provoziert. Des Weiteren kann die Darstellung der Zitate berühmter Physiker ein mögliches Identifikationspotential für Schülerinnen und Schüler aufweisen. Das Schulbuch von Sexl wirkt auf mich theoretischer und weniger bemüht, möglichst viele Schülerinnen und Schüler zu erreichen, sondern eher so, als hätte der Autor mehr die besonders interessierten Schülerinnen und Schüler im Sinn gehabt. Zweifellos werden spannende und wichtige Hintergrundinformationen gegeben, die das Herangehen an eine neue Theorie erleichtern.

Im nächsten Schritt sind die beiden Bücher einander ähnlich in der Hinsicht, dass sie beide die Wellennatur des Lichtes behandeln. Das Big Bang-Schulbuch beginnt mit einer kurzen Wiederholung der Interferenzerscheinungen des Lichtes und geht auf die Beugung des Lichtes ein. Als Nächstes wird kurz die historische Entwicklung der Optik diskutiert, indem Huygens und Newtons Standpunkte gegenübergestellt werden. Das Kapitel mündet im Doppelspaltexperiment, welches nicht mit der Teilchentheorie erklärt werden kann und daher den Siegeszug der Wellentheorie einläutete. Das Schulbuch von Sexl geht ähnlich vor, ist jedoch mehr historisch orientiert. Es beginnt mit dem Fermat'schen Prinzip und beschreibt die Überlegungen von Fermat sehr detailreich. Auf die Idee von Huygen's, der die Bewegung von Lichtteilchen auf die Weitergabe von Stößen zwischen Teilchen des Lichtäthers zurückführt, wird eingegangen. An dieser Stelle greift das Buch kurz dem Lehrplan vor und verweist auf die Ausgabe des Schulbuches für die achte Klasse und beschreibt in einem kurzen Absatz, dass das Konzept des Lichtäthers mit Einsteins spezieller Relativitätstheorie ein Ende gefunden hat. Als Nächstes wird auf die Forschung Newtons eingegangen und fünf Experimente werden besprochen, in denen Newton zeigen konnte, dass Licht von verschiedenen Farben unterschiedlich stark gebrochen wird und weißes Licht alle Spektralfarben enthält. Es folgt eine recht detaillierte Beschreibung der Ansicht Newtons zu Licht und seiner Lichtteilchentheorie. Auf der nächsten Seite wird die Huygen'sche Wellentheorie vorgestellt, ebenso das Huygens'sche Prinzip und seine Annahme, dass es auch im Weltraum einen Lichtäther gibt. Diese beiden Theorien werden als mit einander konkurrierend dargestellt und Young konnte 100 Jahre später die Wellentheorie des Lichtes mit dem Nachweis der Interferenz von Licht mit dem Doppelspaltexperiment nachweisen.

Das Buch von Apolin fasst sich bei diesen Kapiteln kürzer als das Buch von Sexl. Es werden die Phänomene in Erinnerung gerufen, die historische Entwicklung wird kurz in einem Absatz zusammengefasst und das Doppelspalt-Experiment genau besprochen. Während es im Buch von Sexl recht viel Text zum Lesen gibt und es am Rande Bilder oder Diagramme passend zum Text gibt, gibt es im Buch von Apolin noch zusätzliche Gedankenexperimente oder Zusatzinformationen, die über den Inhalt im Text hinausgehen. Auf diese Weise kann jede Schülerin oder Schüler selbst entscheiden, wie weit er sich informieren möchte. Bei diesem Kapitel wird zusätzlich auf die Frage eingegangen, warum CDs schillern und warum Lichtbeugung im Alltag nicht zu bemerken ist. Ich habe den Eindruck, dass dieses Buch mehr Schülerinnen und Schüler zum Nachdenken anregt, wobei ich dem Physikbuch von Sexl entnehme, dass es darin einen sehr viel detaillierteren und umfangreicheren Einblick in Geschichte der Physik gibt, dem jeder zukünftige Naturwissenschaftsstudent gewiss große Vorteile abgewinnen kann. Es stellt sich mir die Frage, inwieweit weniger interessierte Schülerinnen und Schüler von diesem Buch erreicht werden.

Im nächsten Kapitel im Buch von Apolin geht es um den Fotoeffekt. Bevor er besprochen wird, wird noch kurz in Erinnerung gerufen, dass Maxwell zeigen konnte, dass Licht eine elektromagnetische Welle ist. Der Fotoeffekt wird kurz erklärt und Schülerinnen und Schüler werden aufgefordert, eine Erklärung zu finden. Der Ansatz Einsteins sowie der Zusammenhang von Energie und Frequenz werden erläutert. Sexl gibt einen kurzen Überblick über die historische Situation, nämlich dass die klassische Physik nicht in der Lage war die Temperaturstrahlung quantitativ zu beschreiben und die Lösung von Max Planck zu einem radikalen Bruch in der Physik führte. Der Photoeffekt wird eingeleitet mit den Entdeckungen von Hertz. Der Versuch wird ausführlich beschrieben und mit Bildern veranschaulicht. Es wird besonders darauf eingegangen, welche Ergebnisse man im Wellenmodell erwarten würde. Die Lichtquantenhypothese Einsteins wird vorgestellt und der Zusammenhang von Energie und Frequenz gegeben. Auch die Formel der kinetischen Energie der Elektronen wird passend zu dem Experiment angegeben.

Auch hier wird deutlich, dass sich Apolins Buch mehr auf das Wesentliche beschränkt. Der Wichtigkeit des Photoeffekts kann dieses Buch, meiner Meinung nach, nicht ganz gerecht werden. In den Zusatzinformationen wird der Photoeffekt

nochmals aufgegriffen. Das Ablösen der Elektronen wird mit einem Stoß verglichen, der einen Fußball aus einer Grube bekommen soll. Die andere Zusatzinformation beschreibt eine Anwendung des Photoeffekts: die Digitalkamera. Bevor in den nächsten Seiten im Schulbuch von Sexl mehrere Phänomene besprochen werden, wird das Elektronenvolt eingeführt. Anschließend geht es um den äußeren und inneren Photoeffekt, das Röntgenspektrum, den Impuls von Photonen, Strahlungsdruck und den Compton-Effekt. Das Buch dringt an dieser Stelle tiefer in die Materie ein als das Buch von Apolin.

Im nächsten Kapitel werden im Buch von Apolin die Materiewellen eingeführt. In einem Absatz wird die Frage von de Broglie: „Warum sollte diese Doppelnatur nur für Licht gelten?“ aufgeworfen und ebenso die Idee der Materiewellen. Weiters wird festgestellt, dass die Welleneigenschaften für Elektronen nachgewiesen wurden und dass im Prinzip jedem Objekt eine de Broglie-Wellenlänge zugeordnet werden kann, man die Grenzen der Beobachtbarkeit aber noch austesten muss. Die Zusatzinformationen handeln in diesem Fall von dem Elektronenmikroskop und von „Fußballquanten“. Während das Elektronenmikroskop eine Anwendung der de Broglie-Wellenlänge darstellt, beschreibt die andere Zusatzinformation das Wiener Beugungsexperiment mit C_{60} Kohlenstoffatomen, die erfolgreich zur Beugung gebracht wurden. Im nächsten Kapitel wird erst das Doppelspalt-Experiment besprochen und die Frage aufgeworfen, was passiert, wenn nur einzelne Elektronen nacheinander unterwegs sind. Es wird illustriert, wie sich das Interferenz-Muster langsam aufbaut. Darauf aufbauend wird festgestellt, dass sich niemand vorstellen kann, wie ein Teilchen durch beide Spalte gleichzeitig fliegt und quasi mit sich selbst interferiert. Im nächsten Absatz wird kurz festgehalten, dass es eine Wahrscheinlichkeitswelle gibt, die durch beide Spalte geht und einem Aufprallpunkt eine Wahrscheinlichkeit zuordnet. Weiters folgt: „Es ist prinzipiell unmöglich, aus einer Wahrscheinlichkeitsangabe auf ein Einzelereignis zu schließen, egal ob es sich nun um den Aufprallpunkt eines Quants handelt oder um die Augenzahl beim nächsten Wurf.“ (Apolin, 2018, p. 62). Ich persönlich finde es schade, dass man hier nicht tiefer geht. Es wäre eine gute Gelegenheit, den Laplace'schen Dämon zu behandeln und den fundamentalen Unterschied, der klassischen Wahrscheinlichkeit und der quantenmechanischen. Der Laplace'sche Dämon wird erst später bearbeitet. In der Zusatzinformation werden im Rahmen des Doppelspalt-Experiments ein Welcher-Weg-Detektor, und das darauffolgende Verschwinden des Interferenzmusters behandelt. Die zweite Zusatzinformation

behandelt die theoretische Beschreibung der Quantenmechanik. Das Symbol der Wellenfunktion Ψ wird eingeführt und auch, dass die Wahrscheinlichkeitsdichte das Betragsquadrat der Wellenfunktion $|\Psi|^2$ ist. Das Schulbuch von Sexl beginnt das nächste Kapitel mit der Eingangsfrage, wie Licht gleichzeitig Teilchen und Welle sein kann. Es folgt eine wissenschaftstheoretische Auseinandersetzung mit möglichen Interpretationen von Experimenten. Es wird dem Leser nahegelegt, dass Interferenz noch kein Beweis für eine Welle ist und es eine übergeordnete Theorie geben kann, die die Teilchen- und Wellenaspekt miteinander vereint. Diese Theorie spricht zwar von Wellen- und Teilcheneigenschaften, jedoch deswegen, weil unsere Sprache schlecht geeignet ist, Phänomene zu beschreiben, die wir nicht im Alltag beobachten können. Um den Teilchenaspekt des Lichtes zu illustrieren, wird eine Fotografie herangezogen, deren Entstehung man bei unterschiedlichen Belichtungszeiten betrachtet. So wird deutlich, dass ein Bild aus Einzelpunkten entsteht. Aus diesen Überlegungen heraus wird nochmal die Beugung am Spalt betrachtet. Auch hier baut sich das Interferenzmuster mit der Belichtungszeit langsam auf. Es wird festgestellt, dass: „Das Quadrat der Amplitude einer Lichtwelle ist proportional der Wahrscheinlichkeit proportional, ein Photon in einem bestimmten Raumbereich anzutreffen.“ (Sexl, et al., 2018, p. 94). Auf die Wahrscheinlichkeitsaspekte des Lichtes wird eingegangen, jedoch ohne dessen fundamentale Bedeutung zu beachten. Jedoch wird besonders betont, dass Quantenobjekte weder Teilchen noch Wellen sind, sondern prinzipiell neuartige Objekte. Im nächsten Kapitel wird die Hypothese von de Broglie vorgestellt und die kinetische Energie für quantenmechanische Objekte explizit angegeben sowie auch die Formel der de Broglie-Wellenlänge. Das Doppelspaltexperiment wird neu aufgerollt und als Gedankenexperiment einmal mit klassischen Teilchen und einmal mit quantenmechanischen Objekten beleuchtet. Diese Gedankenexperimente werden detailliert beschrieben und mit mehreren Abbildungen illustriert. Abschließend wird festgestellt, dass das Verhalten von Elektronen beim Durchgang eines Spaltes durch die Wellenfunktion Ψ beschrieben wird, sowie dass die Wahrscheinlichkeit des Auftreffens eines Elektrons an einer bestimmten Stelle des Schirms von dem Quadrat der Amplitude der Welle bestimmt wird. Es folgt ein Kapitel, in dem besprochen wird, was der Unterschied zwischen klassischen Teilchen und den Quantenobjekten ist und wieso das Quadrat der Wellenfunktion die Aufenthaltswahrscheinlichkeit angibt. Zu guter Letzt wird noch die Frage in den Raum gestellt, was passiert, wenn nur einzelne Elektronen

unterwegs sind. Interferieren Elektronen mit sich selbst? Darauf wird mit einem Gedankenexperiment geantwortet, welches feststellt, dass wenn man misst durch welchen Spalt jedes einzelne Elektron gegangen ist, dann gibt es auch kein Interferenzmuster. An dieser Stelle wird erläutert, dass man von einer Bahn eines Elektrons nicht sprechen kann. Auch in diesem Buch wird die Beugung von C_{60} Molekülen in einer Informationsbox beschrieben.

Auch in diesen Kapiteln wird deutlich, dass beide Bücher einen sehr ähnlichen Aufbau haben, vergleichbare Experimente beleuchten und ähnlich argumentieren. Beide Bücher gehen nicht tiefer auf den grundlegenden Charakter der Wahrscheinlichkeit in der Quantenmechanik ein. Das Buch von Sexl erläutert das Doppelspaltexperiment mit Elektronen sehr viel detailreicher und geht mehr auf fundamentale Frage der Quantenmechanik ein als das Buch von Apolin. In Apolins Buch wird die Frage über den Weg des Elektrons im Doppelspaltexperiment in einer Info-Box angesprochen und läuft darauf hinaus, dass das Interferenzmuster verschwindet, sobald die Information in einer Form vorhanden ist, wohingegen das Buch von Sexl noch darauf eingeht, dass man in der Quantenmechanik auch nicht mehr von einem Weg sprechen kann. Der Unterschied zwischen klassischen Teilchen und quantenmechanischen Objekten wird im Buch von Sexl genau erklärt, wobei die historische Entwicklung dargestellt wird, wobei der anfängliche Blickwinkel des Welle-Teilchen-Dualismus überholt wird und auch erklärt wird, dass man nur von Wellen- und Teilcheneigenschaften sprechen kann. Darauf aufbauend wird auch darauf eingegangen, dass sich Quantenobjekte prinzipiell der menschlichen Alltagserfahrung entziehen. Dieser Sachverhalt wird in Apolins Buch in der Einleitung zum Thema Quantenmechanik angeschnitten, danach jedoch nicht mehr berührt. Es wird von Anfang an immer von Teilcheneigenschaften und Welleneigenschaften gesprochen. Bis dahin gibt es weder eine Gegenüberstellung von klassischen Teilchen mit quantenmechanischen Objekten noch eine historische Entwicklung des Begriffs oder einen anderen Hinweis auf die Bildung der quantenmechanischen Begriffe.

Im nächsten Kapitel wird die Heisenbergsche Unschärferelation beleuchtet. Apolins Buch nimmt den Zufall ins Visier und beginnt mit der Behauptung von Laplace, dass man die weitere Entwicklung vorhersagen könnte, wenn man alle Naturgesetze und alle Zustände zu einem beliebigen Zeitpunkt kennen würde. Der Begriff „Determinismus“ wird eingeführt und Argumente, warum dieser aus

quantenmechanischer Sicht nicht mehr haltbar ist, werden gegeben. Es wird argumentiert, dass in der Quantenmechanik nur Wahrscheinlichkeitsaussagen gemacht werden. Auch an dieser Stelle wird der quantenmechanische Zufall mit dem Zufall von Würfeln verglichen, was meiner Meinung nach problematisch sein kann, wenn nicht auf den klassischen Zufall hingewiesen wird. „Du kannst nur eine Wahrscheinlichkeit angeben, ähnlich wie beim Würfeln.“ (Apolin, 2018, p. 63). Ohne nähere Erklärung wird festgestellt, dass es unmöglich ist, sowohl den exakten Aufenthaltsort als auch den exakten Impuls eines quantenmechanischen Objekts gleichzeitig zu bestimmen. Beim Messen bleibt immer eine gewisse Ungewissheit, die man Unschärfe nennt. Dieses Phänomen hat Heisenberg in der Heisenbergschen Unschärferelation formuliert. In einer Infobox wird die Unschärferelation mit Hilfe von Beugung an einem Spalt qualitativ hergeleitet. Es wird deutlich gemacht, dass bei einer Verkleinerung des Spaltes der Impuls unschärfer wird und umgekehrt. Die Unschärferelation wird mathematisch definiert und nochmals festgehalten, dass es nicht möglich ist, Orts- und Impulsunschärfe gleichzeitig zu verringern. An dieser Stelle wird der Bahnbegriff aufgegriffen und argumentiert, dass aufgrund der Heisenbergschen Unschärferelation von einer Bahn nicht die Rede sein kann. In einem kurzen Absatz wird auf einen möglichen Einwand von Schülerinnen oder Schüler eingegangen, dass die Unschärfe an unvollkommenen Messverfahren liegt und klar festgestellt, dass die Unschärfe eine prinzipielle Eigenschaft der Natur ist. Am Ende des Kapitels wird noch die Formel für die Heisenbergsche Unschärferelation angegeben. In einer Infobox wird noch auf die Fourier-Synthese eingegangen, in einer anderen wird der Bahnbegriff nochmals aufgerollt. Anhand des Beispiels der Bahnberechnung einer Weltraumsonde wird deutlich, dass ein Elektron aufgrund der Heisenbergschen Unschärferelation nach 12 Jahren um die 20 Millionen Meter von der „Bahn“ abweichen könnte. Das Buch von Sexl startet das Kapitel über die Heisenbergsche Unschärferelation mit der Frage, wie sich Teilchenbahnen festlegen lassen. Dazu wird das Experiment der Braun'schen Röhre beschrieben. Versuche mit Wasserwellen führen zu der Erkenntnis, dass wenn der Blendendurchmesser ähnlich groß wie die Wellenlänge ist, sich Beugungsphänomene beobachten lassen. Daraus wird gefolgert, dass wenn die Blendenöffnung deutlich größer ist als die de Broglie-Wellenlänge der Teilchen, sich von einem Teilchenstrahl sprechen lässt, der nicht maßgeblich auseinanderläuft. „Teilchenbahnen können nur mit einer Genauigkeit von einigen de Broglie-Wellenlängen festgelegt werden.“ (Sexl, et al.,

2018, p. 97). Diese Überlegungen werden weitergeführt und führen auf die Heisenbergsche Unschärferelation hin, die mit Hilfe der Formel für das erste Beugungsminimum plausibel gemacht wird. Anschließend wird die Unschärferelation präziser erläutert und festgestellt, dass auch genauere Messungen nichts an der Unschärferelation ändern. Es folgt ein Zitat von Laplace, mit welchem der Determinismus der klassischen Mechanik beschrieben wird. Es wird deutlich gemacht, dass diese Idee aufgrund der Heisenbergschen Unschärferelation nicht mehr möglich ist. Einige Folgerungen der Heisenbergschen Unschärferelation werden Schülerinnen und Schülern nähergebracht. Aufgrund der Unschärferelation haben gebundene Elektronen, je kleiner der verfügbare Raum ist, eine umso größere minimale kinetische Energie. In einer Infobox wird der Tunneleffekt besprochen.

Beide Bücher verfolgen einen sehr ähnlichen Aufbau. Das Buch von Apolin beschreibt die wichtigen Eckpunkte der Heisenbergschen Unschärferelation und gibt Schülerinnen und Schülern durch die Infoboxen Hintergrundwissen und ebenso schülergerechte Anwendungen zur Unschärferelation. Das Buch von Sexl hingegen gibt eine mathematische Herleitung zur Unschärferelation an. Es beschreitet den mehr mathematischen Weg und beleuchtet gleichzeitig das fundamental Neue der Quantenmechanik gegenüber der klassischen Mechanik. Die Anwendungsbeispiele im Buch von Apolin sind bildlich beschrieben und geben vertiefende Informationen. Im Buch von Sexl werden die Anwendungsbeispiele auf Schulniveau mathematisch beschrieben und geben Einblick in tieferliegende physikalische Zusammenhänge, wie die Nullpunktsenergie. Ich habe den Eindruck, dass das Buch von Apolin darauf abzielt, möglichst viele Schülerinnen und Schüler zu erreichen, indem größtenteils auf eine mathematische Beschreibung verzichtet wird und die Infoboxen voll sind mit anschaulichen, anwendungsorientierten Beispielen. Die Beschreibung der physikalischen Themen wird auf ein Minimum beschränkt. Jedoch finden interessierte Schülerinnen und Schüler in den Infoboxen recht viel vertiefendes Material, welches über den Stoff im Lehrplan hinausgeht. Das Buch von Sexl beschreibt den Stoff im Lehrplan ausführlich und gibt eine schulgerechte mathematische Beschreibung. Das fundamental Neue an der Quantenmechanik wird gut herausgearbeitet und mit der klassischen Physik verglichen. In den meisten Fällen wird auch Bezug auf die historische Entwicklung genommen. Mir persönlich ist die Darstellung im Buch von Apolin etwas zu knapp und ich habe den Eindruck, dass gewisse Dinge nicht den Raum haben, den sie

brauchen, wie zum Beispiel das Doppelspaltexperiment, der Determinismus in der klassischen Physik, die Existenz eines Weges in der Quantenmechanik und der Zufall in der Quantenmechanik. Auf der anderen Seite ist das Buch von Sexl etwas zu trocken. Für Schülerinnen und Schüler, die sich eine weiterführende naturwissenschaftliche Ausbildung vorstellen können, sind die genaue Darstellung und die mathematische Beschreibung von Vorteil. Schülerinnen und Schüler, die einen adäquaten Überblick über physikalische Zusammenhänge wünschen, könnten den Wald vor lauter Bäumen nicht sehen.

3.3 Forschungsstand Physikdidaktik

Die Quantenmechanik bietet eine Vielzahl an kognitiven Konflikten für Schülerinnen und Schüler, da sie den Erfahrungen des alltäglichen Lebens oftmals widerspricht. Man kann sie als einen der schwierigsten Themenbereiche der Schulphysik sehen. Bis heute gibt es dazu ungeklärte Fragestellungen und der zugehörige Formalismus ist äußerst komplex. Um sich diesem Unterrichtsthema zu nähern, gibt es verschiedene Konzepte, die unterschiedliche Schwerpunkte setzen und Wege finden den Umfang des Stoffgebiets einzugrenzen.

In dem Artikel: „Das Münchner Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik“ von Rainer Müller und Hartmut Wiesner (https://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/archiv/inhalt_materialien/milq/muc_unterricht.pdf) werden die verschiedenen Unterrichtskonzepte voneinander unterschieden, indem sie in verschiedene Kategorien eingeteilt werden:

- a) Unterrichtskonzepte, die vordergründlich den quantenmechanischen Formalismus behandeln (z.B. Feynman-Zeiger) und von diesem ausgehend verschiedene Problemstellungen aufgreifen,
- b) Unterrichtskonzepte, die die begrifflichen Fragestellungen der Quantentheorie in den Vordergrund stellen,
- c) Unterrichtskonzepte, die die Quantenmechanik als Ausgangspunkt zum Verständnis anderer physikalischer Theorien (z.B. Atomphysik, Kernphysik, Teilchenphysik, Festkörperphysik) ansehen,
- d) Unterrichtskonzepte, in denen der Schwerpunkt auf die technischen Anwendungen (z.B. Laser, Transistor) gelegt wird.

Jedes Konzept stellt natürlich eine Mischung dieser vier Grundtypen dar. Die Grundprinzipien müssen im Rahmen des Unterrichts eingeführt werden, verschiedene Deutungsfragen werden behandelt, technische Anwendungsmöglichkeiten werden besprochen und die Atomphysik wird mit Schülerinnen und Schülern diskutiert.

Laut dem Artikel von Müller und Wiesner zählen die Vorschläge von Bader, Küblbeck sowie Erb und Schön zu der Kategorie a). Diese bedienen sich des Zeigerformalismus Feynmans, vernachlässigen jedoch die physikalischen Anwendungen (Atome, gebundene Systeme). Das Konzept von Niedereder zählt zur Kategorie c). Analog zu stehenden Wellen in inhomogenen Medien wird die Schrödingergleichung den Schülerinnen und Schülern plausibel gemacht. Die Beschreibungen des Wasserstoff-Atoms und höherer Atome nehmen eine besondere Stellung ein. Zur Kategorie d) lässt sich das „Visual Quantum Mechanics“-Konzept von Zollman zählen. Die Spektren von LEDs und die Bandstruktur in Festkörpern werden den Schülerinnen und Schülern durch Simulationsprogrammen nähergebracht. Das Berliner Konzept von Fischer, Lichtfeld u. a. kann der Kategorie b) zugerechnet werden. Dieses Konzept zeigt den Unterschied zwischen klassischer und Quantenphysik besonders auf und vermeidet Bezüge zur klassischen Physik, wie dem Bohr'schen Atommodell. Die statistische Deutung der Quantenmechanik steht im Vordergrund. Das Münchner Unterrichtskonzept wird in zwei Teile gegliedert. Verschiedene Deutungsfragen werden genau behandelt, z.B. wird anhand des Doppelspaltexperiments erarbeitet, dass ein Elektron die Eigenschaft „Aufenthaltort“ im Allgemeinen nicht besitzt. Der zweite Teil ist dem Formalismus der Quantenmechanik (z.B. Eigenwertgleichung) gewidmet. Er lässt sich der Kategorie a) zuordnen.

3.3.1 Unterrichtskonzepte

Das Münchner Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik

In dem Artikel: „Das Münchner Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik“ von Rainer Müller und Hartmut Wiesner (https://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/archiv/inhalt_materialien/milq/muc_unterricht.pdf) wird deren Unterrichtskonzept vorgestellt.

Es werden übergeordnete Unterrichtsziele formuliert, die die Leitgedanken des Unterrichtskonzepts widerspiegeln.

1. Da die Quantenmechanik einen wesentlichen Beitrag zur Entwicklung des physikalischen Weltbilds geleistet hat, sollen die Aspekte der Quantenmechanik, die das „ganz Neue“ gegenüber der klassischen Physik darstellen, besonders herausgearbeitet werden.
2. Es ist schwer möglich, die Quantenmechanik mit der Schulmathematik ausreichend zu beschreiben. Daher ist es besonders wichtig, den Schülerinnen und Schülern adäquate Begriffe zur Verfügung zu stellen, mit denen sie die neuartigen Phänomene in Worte fassen können.

Des Weiteren wird die Born'sche Wahrscheinlichkeitsinterpretation gleich zu Beginn als ein wesentlicher Teil der Quantenmechanik eingeführt und nicht erst im Zuge der Orbitale im Atommodell. Dem Begriff „Präparation“ wird große Bedeutung zugemessen, um die Wahrscheinlichkeitsinterpretation gut zu formulieren. Die Ensemble-Interpretation der Quantenmechanik wird verwendet, da sie eine klare und einfache Sprechweise zur Verfügung stellt. Anders als in der klassischen Physik sind dynamische Eigenschaften wie Ort oder Impuls hier wesentlich komplizierter, da quantenmechanische Objekte in Zustände gebracht werden können, in denen man von Attributen wie „Ort“, „Bahn“ oder „Energie“ nicht sprechen kann. Diesem Umstand soll ebenfalls große Aufmerksamkeit zuteilwerden. Schülerinnen und Schüler sollen erkennen, welchen Wert dem quantenmechanischen Messprozess zukommt sowie den Unterschied zwischen einem Attribut zu messen und ein Attribut zu haben. In der Quantenmechanik findet diese Eigenschaft in der Zustandsreduktion nach einer Messung Ausdruck.

Die Grundidee des Münchner Unterrichtskonzepts ist eine zweifache Durchlaufung der wichtigen Punkte der Quantenmechanik, um die Themen zu wiederholen, zu vertiefen und komplexere Begriffe auszubilden. Im ersten Durchgang wird ein Interferometer mit Photonen betrachtet. Dabei werden Begriffe wie Wahrscheinlichkeitsinterpretation, nichttrivialer Eigenschaftsbegriff und Welle-Teilchen-Problematik qualitativ ausgearbeitet. Im nächsten Durchlauf wird das Doppelspaltexperiment mit Elektronen erläutert und dieselben Begriffe werden diskutiert, allerdings, mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsinterpretation der Wellenfunktionen, auf höherem Niveau. Anschließend wird der quantenmechanische Messprozess behandelt.

Den Beginn des Münchner Unterrichtskonzepts markiert der Photoeffekt. Das historische Problem, dass der Photoeffekt nicht mit der klassischen

Wellenvorstellung erklärt werden kann, wird durch Einsteins Überlegungen aufgelöst. Die Schülerinnen und Schüler werden mit der Energiegleichung für Photonen konfrontiert: $E = hf$ mit der Energie (E), der Frequenz (f) und dem Planck'schen Wirkungsquantum (h). Ein Experiment zur Überprüfung der Einstein-Gleichung kann durchgeführt werden.

Im nächsten Schritt geht es um den Begriff „Präparation“. Um die Schülerinnen und Schüler an das Thema heranzuführen, wird ihnen ins Gedächtnis gerufen, dass das gezielte Präparieren von Zuständen auch in der klassischen Mechanik und Optik sehr oft vorkommt. Möchte man zum Beispiel das Gesetz für die Bahnkurve des horizontalen Wurfes überprüfen, so ist es wichtig, dass die Anfangswerte Ort und Geschwindigkeit des Wurfobjekts gleich präpariert sind.

Aus der Optik kann die Eigenschaft „Polarisation“ betrachtet werden. Man kann die Eigenschaft „Polarisation“ präparieren. Wenn ein waagrecht eingestellter Polarisationsfilter mit Licht bestrahlt wird, verliert das Licht ungefähr die Hälfte der ursprünglichen Intensität. Wenn man dieses Licht durch einen zweiten waagrecht eingestellten Polarisationsfilter schickt, dann ist die Intensität ungefähr gleich. Daraus lässt sich schließen, dass bei dem ersten Polarisationsfilter eine Eigenschaft präpariert wurde (waagrechte Polarisation), da der zweite Filter keine wesentlichen Veränderungen mehr herbeiführen konnte. Stellt man den zweiten Polarisationsfilter senkrecht ein, wird gar kein Licht durchgelassen. Auf diese Art wird eine andere Eigenschaft getestet (senkrecht polarisiert). Daraus lässt sich folgern, dass waagrecht polarisiertes Licht die Eigenschaft „senkrecht polarisiert“ nicht besitzt. Man kann diese beiden Eigenschaften nicht gleichzeitig präparieren.

Im nächsten Schritt wird mit einem Mach-Zehnder-Interferometer gearbeitet. Wenn man das Verhalten von Photonen betrachtet, wird ein Interferenzmuster sichtbar. Hier wird der Wellenaspekt des Lichtes deutlich. An dieser Stelle kann man sich fragen, was passiert, wenn man die Intensität so verringert, dass nur ein einzelnes Photon unterwegs ist. Kann man Welle- und Teilcheneigenschaften im gleichen Experiment beobachten? Die Photonen werden nacheinander auf dem Schirm deutlich und das Interferenzmuster baut sich mit verstreichender Zeit auf. Um dieses Phänomen zu erklären, müssen Welle- und Teilchenaspekte zusammen in die Theorie einfließen.

Als nächstes wird sich der Frage zugewandt, ob ein Photon im Interferometer die Eigenschaft „Ort“ besitzt. Da ein Photon auf dem Schirm gut in einem kleinen

Raumbereich sichtbar ist, sind Schülerinnen und Schüler versucht mit „ja“ zu antworten. Zu dieser Fragestellung werden Polarisationsfilter in das Mach-Zehnder-Interferometer eingebaut.

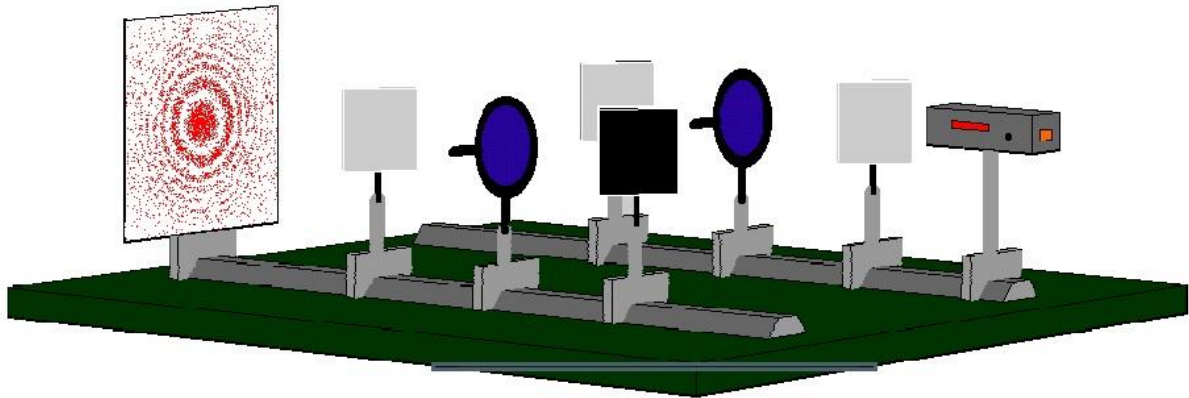


Abbildung 4: Mach-Zehnder-Interferometer mit senkrecht eingestellten Polarisationsfiltern. Quelle: (Müller, et al., 2020, p.7)

Wenn beide Polarisationsfilter parallel sind, ist ein Interferenzmuster sichtbar. Sind sie jedoch senkrecht zueinander erscheint kein Interferenzmuster. Im Falle eines Interferenzmusters gibt es Ortsgebiete am Schirm, in denen mit hoher Wahrscheinlichkeit kein Photon landen wird. Im anderen Fall können Photonen jedoch dort beobachtet werden. Das bedeutet, dass man die Einstellung beider Polarisationsfilter kennen muss, um eine Aussage über die Aufenthaltswahrscheinlichkeit treffen zu können. Wäre ein Photon ein lokalisiertes Objekt und würde es einer bestimmten Bahn folgen, dann würde auch die Einstellung des anderen, nicht passierten Polarisationsfilters für das betrachtete Photon eine Rolle spielen. Möchte man solche Fernwirkungen vermeiden, kommt man zu der folgenden Aussage: „Man darf sich ein Photon nicht als lokalisiertes Gebilde mit einem festen Ort vorstellen; man kann ihm nicht einen der beiden Wege zuschreiben.“ (Müller, et al., p. 8). Genauer betrachtet lässt sich dieses Phänomen auch mit dem Eigenschaftsbegriff beschreiben. In diesem Fall kann man den Weg eines Photons durch die Eigenschaft „Polarisation“ markieren. Ein Photon ist, wenn es am Schirm angekommen ist, immer entweder waagrecht oder senkrecht polarisiert, je nachdem, welchen Weg es gegangen ist. Dadurch ist die Information, welcher Weg genommen wurde, für jedes Photon vorhanden. „Das Versuchsergebnis bedeutet: Kann man jedem Photon, das am Schirm eintrifft, die Eigenschaft „Weg“ oder „Ort“ zuschreiben, erhält man kein Interferenzmuster.“ (Müller, et al., p. 8). Man muss die Polarisation der Photonen am Schirm gar nicht

messen, es genügt, wenn die Information prinzipiell vorhanden ist. In diesem Experiment zeigt sich, dass Photonen die Eigenschaft „Weg“ nicht besitzen, wenn die Polarisationsfilter parallel sind. Hätten sie die Eigenschaft „Weg“, dann wäre kein Interferenzmuster sichtbar. „Dies ist ein erstes Beispiel dafür, dass Quantenobjekten klassisch wohldefinierte Eigenschaften unter Umständen *nicht* zugeschrieben werden können.“ (Müller, et al., p. 8). Zu diesem Phänomen äußern Schülerinnen und Schüler immer wieder den Einwand, dass sich das Photon am halbdurchlässigen Spiegel aufteilen und somit beide Wege gehen könnte. Diesen Einwand kann man experimentell widerlegen. Wenn man Detektoren in beide Wege stellt, findet man immer, dass nur ein Detektor etwas misst. Es werden keine „Teile“ eines Photons gefunden.

Um den statistischen Aspekt der Quantenmechanik den Schülerinnen und Schülern näherzubringen, wurde das Doppelspalt-Experiment gewählt. Der Aufbau des Doppelspaltexperiments umfasst eine Lichtquelle bzw. eine Quantenteilchenquelle, eine Blende mit Einzel- oder Doppelspalt, deren Breite und Abstand sich einstellen lassen und einen Schirm. Das klassische Doppelspalt-Interferenzmuster wird für die Schülerinnen und Schüler nochmals wiederholt. Wenn man dieses Experiment mit einzelnen Photonen, welche einzeln unterwegs sind, durchführt, dann kann man beobachten, wie sich das Interferenzmuster nach und nach aufbaut. Wenn man dieses Experiment als Simulation vorstellt, können die Schülerinnen und Schüler versuchen vorherzusagen, wo das nächste Photon auftreffen wird. Es wird davon ausgegangen, dass das nicht gelingt. Jedoch ist das möglich, wenn man nicht das nächste Photon, sondern die nächsten 100 Photonen vorhersagen möchte. Man kann Prognosen aufstellen an welchen Stellen viele und an welchen wenige Photonen eintreffen. Darauf lässt sich die Argumentation aufbauen, dass man für das einzelne Photon keine Voraussage treffen kann, an welcher Stelle es landen wird. „In der Quantenmechanik sind über Einzelereignisse nur in beschränktem Maß Vorhersagen möglich. Es ist notwendig, zu *Wahrscheinlichkeitsaussagen* überzugehen.“ (Müller, et al., p. 10). An dieser Stelle kann der Begriff „Ensemble“ eingeführt werden. Ein Ensemble ist eine Menge von Objekten, die in gleicher Weise präpariert sind und sich nicht beeinflussen. Man kann daher sagen, dass die Quantenmechanik statistische Aussagen über relative Häufigkeiten eines Ensembles macht. Wenn man die gleiche Serie von Experimenten an einem Ensemble durchführt, ergeben sich auch dieselben

Verteilungen der relativen Häufigkeiten. In diesem Sinne genügt die Quantenmechanik auch dem Anspruch der Reproduzierbarkeit.

Ab hier beginnt der zweite Durchlauf des Unterrichtskonzepts. Schülerinnen und Schüler sind dank der vorhergegangenen Unterrichtseinheiten in der Lage, die folgenden Überlegungen besser zu verstehen und bereit, mehr in die Tiefe der Thematik vorzudringen. Zu Beginn wird mit Hilfe einer Elektronenbeugungsröhre der Wellenaspekt von Elektronen demonstriert und mit der de-Broglie-Beziehung in Verbindung gebracht. Als nächstes wird mit Elektronen das Doppelspalt-Experiment durchgeführt. Analog zu dem Experiment mit Photonen ist beobachtbar, wie sich das Interferenzmuster, mit jedem einzelnen Elektron langsam aufbaut. Es können nur Wahrscheinlichkeitsaussagen getroffen werden. Nun werden die Begriffe Wahrscheinlichkeitsverteilung und Wellenfunktion eingeführt. Es wird festgestellt, dass man einem Ensemble eine Wellenfunktion $\Psi(x)$ zuordnet, die sich wie eine Welle ausbreitet und Wellengesetzen gehorcht. Die Wahrscheinlichkeitsdichte $P(x)$, die jedem Ort eine Wahrscheinlichkeit zuordnet, ob man bei einer Messung an dem Ort x ein quantenmechanisches Objekt auffindet, ist: $P(x) = |\Psi(x)|^2$. Wird der Aufenthaltsort eines Quantenobjekt gemessen, dann verhält es sich wie ein Teilchen. Es wird als Ganzes in einem begrenzten Raumbereich gefunden. „Der Welle-Teilchen-Dualismus wird durch die so formulierte Wahrscheinlichkeitsinterpretation aufgehoben: „Das wellenhafte Verhalten der Wellenfunktion und das teilchenhafte Verhalten beim Nachweis der Quantenobjekte erfassen die beiden scheinbar gegensätzlichen Züge in einem einheitlichen Bild.“ (Müller, et al., p. 10).

Dass man Photonen im Allgemeinen keinen Weg bzw. Aufenthaltsort zuschreiben kann, wurde im Interferometer-Versuch demonstriert. Im Doppelspalt-Experiment wird nun dasselbe für Elektronen gezeigt. Im Rahmen der klassischen Physik kann man einem Elektron zu jedem Zeitpunkt einen Aufenthaltsort zuschreiben und daher auch eine wohldefinierte Bahn. Da ein Elektron ein quantenmechanisches Objekt ist, ist das nicht mehr möglich. Man kann nicht angeben, durch welchen Spalt das Elektron gegangen ist. Diese Eigenschaft lässt sich experimentell überprüfen, indem man einen Spalt abdeckt und das Muster am Schirm betrachtet. Es zeigt sich, dass wenn man zuerst einen Spalt abdeckt und danach einen anderen Spalt abdeckt, dass die beiden so entstandenen Schirmmuster, wenn man sie übereinanderlegt, nicht das Interferenzmuster bilden, welches entsteht, wenn

beide Spalte gleichzeitig geöffnet sind. Diese Aussage lässt sich in mathematische Form bringen, indem man die Aufenthaltswahrscheinlichkeitsdichte, wenn man einen Spalt abdeckt, $P_A(x)$ nennt, und analog ist die Aufenthaltswahrscheinlichkeitsdichte, wenn man den anderen Spalt abdeckt $P_B(x)$. Nennt man die Aufenthaltswahrscheinlichkeitsdichte, wenn man beide Spalte offen lässt $P_{A\&B}(x)$, so zeigt sich, dass folgendes gilt: $P_{A\&B} \neq P_A(x) + P_B(x)$. Daher kann man sagen, dass die Elektronen die Eigenschaft „Aufenthaltort“ nicht haben, wenn sie im Doppelspalt-Experiment sind. Diese Erkenntnis ist analog zu der Erkenntnis des Aufenthaltsortes bezüglich der Photonen im Interferometer. Man kann erwarten, dass die Schülerinnen und Schüler in der Lage sind, aus diesem Experiment ihre Schlüsse selbstständiger zu ziehen und ihre Gedanken besser in Worte zu fassen.

An dieser Stelle könnte man mit den Schülerinnen und Schülern besprechen, was passiert, wenn man dennoch den Aufenthaltsort eines Elektrons messen möchte, bzw. wenn man messen möchte, durch welchen Spalt ein Elektron gegangen ist, ohne einen Spalt abzudecken. Man kann die Elektronen in der Spaltebene beleuchten, auf diese Weise kann für jedes Elektron ein Lichtblitz beobachtet werden, der Auskunft gibt, durch welchen Spalt das Elektron, welches gerade unterwegs ist, gegangen ist. Analog zum dem Interferometer-Versuch mit Photonen gibt es auch hier kein Interferenzmuster, wenn die Information, welchen Weg ein Quantenobjekt genommen hat, in irgendeiner Form vorhanden ist.

Der Messprozess in der Quantenmechanik ist eine eigene Sache für sich. Wenn man davon ausgeht, dass ein quantenmechanisches Objekt die Eigenschaft „Aufenthaltort“ nicht besitzt, dann kann die klassische Ansicht, dass es sich bei einer Messung um eine Kenntnisnahme eines bereits feststehenden Wertes handelt, nicht mehr haltbar sein. Daraus lässt sich folgern, dass es in der Quantenmechanik einen Unterschied gibt zwischen „eine Eigenschaft haben“ und „eine Eigenschaft messen“. Durch dieses Experiment lässt sich auch demonstrieren, dass sich die Wellenfunktion nach einer Messung ändert. Wenn man misst durch welchen Spalt die Elektronen geflogen sind, dann verändert sich das Muster am Schirm. Es wird kein Interferenzmuster sichtbar, daher verändert sich auch die Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Elektronen, die durch von der Wellenfunktion $\Psi(x)$ abhängt. Die Wellenfunktion ändert sich nach einer Messung

abrupt. Dieses Phänomen wird Zustandsreduktion genannt. An diesem Punkt kann man vertiefend über Schrödingers Katze oder die Idee der Dekohärenz sprechen.

Als nächstes wird die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation thematisiert. Im Rahmen der klassischen Mechanik können Ort und Impuls eines Objekts gleichzeitig präpariert werden, zum Beispiel bei einem horizontalen Wurf. Werden Photonen eines Laserstrahls betrachtet, so sind diese monochromatisch und sehr gut gebündelt. Dieses Ensemble von Photonen ist auf die Eigenschaft „Impuls“ gut präpariert. Möchte man zusätzlich noch die Ortseigenschaft mit Hilfe eines Einzelspalt präparieren, wird deutlich, dass es in der Quantenmechanik nicht möglich ist, ein Ensemble von quantenmechanischen Objekten gleichzeitig auf Impuls und Ort zu präparieren.

Im Folgenden wird die Unbestimmtheitsrelation auch quantitativ formuliert, indem die Ortsstreuung Δx und die Impulsstreuung Δp als Standardabweichung einer statistischen Verteilung und als ein Maß für die Güte einer Präparation eingeführt werden. Aus einer genauen Analyse des Experiments von der Beugung von Photonen an einem Einzelspalt wird schließlich die Heisenbergsche Unschärferelation formuliert: $\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$.

Hier endet der zweite Durchlauf der wichtigen Punkte der Quantenmechanik. Als nächstes wird ein quantitativer Aufbaukurs besprochen, der sich hauptsächlich an Leistungskurse richtet. Im Münchner Unterrichtskonzept wird, bei der Einführung der Wellenfunktion für freie Elektronen auf komplexe Zahlen verzichtet. Die Wellenlänge der Wellenfunktion ψ , welche als eine Kombination von Sinus- und Kosinus Funktion angesetzt wird, folgt aus der de-Broglie-Beziehung. $\psi(x, t) = A \cdot \sin\left(\frac{\sqrt{2mE_{kin}}}{\hbar}x - \frac{2\pi t}{T}\right) + B \cdot \sin\left(\frac{\sqrt{2mE_{kin}}}{\hbar}x - \frac{2\pi t}{T}\right)$ mit dem Ort (x), der Zeit (t), der Masse eines Elektrons (m), der kinetischen Energie (E_{kin}), dem Wirkungsquantum ($\hbar$), der Periodendauer (T) und den Konstanten (A, B). Die Wellenfunktion ist nur dann eine Lösung der Schrödinger Gleichung, wenn gilt: $A = iB$. Darauf wird hier nicht weiter eingegangen, da man die komplexen Zahlen vermeiden möchte. Um die mathematische Beschreibung überschaubar zu halten, werden im Folgenden nur stationäre Vorgänge betrachtet. Das Konzepts eines Operators wird eingeführt, indem die Frage in den Raum geworfen wird, wie man zum Beispiel die kinetische Energie aus der Wellenfunktion ermitteln kann. Auf der experimentellen Seite wird eine Messung vorgenommen, auf der theoretischen Seite wird ein Operator auf die

zugehörige Wellenfunktion eines Ensembles angewandt. Wenn es um die kinetische Energie geht, lautet der Operator: $\hat{E}_{kin} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2}$. Wird dieser Operator auf die Wellenfunktion angewandt, wird die Wellenfunktion bis auf einen Vorfaktor reproduziert, welcher die kinetische Energie angibt.

Wenn die Wellenfunktion nicht reproduziert wird, dann kann man daraus schließen, dass diese Wellenfunktion kein Ensemble von quantenmechanischen Objekten beschreibt, das auf die kinetische Energie präpariert worden ist. Auf diese Art kann man überprüfen, auf welche Eigenschaften das Ensemble präpariert worden ist. Wird die Wellenfunktion reproduziert, sagt man, dass sie eine sogenannte Eigenwertgleichung erfüllt. Die Eigenwertgleichung für die Eigenschaft „kinetische Energie“ lautet: $\hat{E}_{kin}\Psi(x) = E_{kin} \cdot \Psi(x)$. Wird diese Eigenwertgleichung nicht erfüllt, wurde das beschriebene Ensemble nicht auf die Eigenschaft „kinetische Energie“ präpariert und die quantenmechanischen Objekte besitzen diese Eigenschaft nicht.

Werden stationäre Zustände betrachtet, wird keine Energie mit der Umgebung ausgetauscht, daher besitzen solche Quantenobjekte die Eigenschaft „Gesamtenergie“. Die Eigenwertgleichung zur Gesamtenergie heißt Schrödingergleichung: $\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} + V(x)\right]\Psi(x) = E \cdot \Psi(x)$. Die Gleichung beschreibt unter anderen die Elektronenzustände in Atomen.

Wenn man sich der Atomphysik zuwenden möchte, können als Einstieg Elektronen in einem unendlich hohen eindimensionalen Potentialtopf betrachtet werden. Die Quantisierung der Energie ergibt sich automatisch durch die vorgegebenen Randbedingungen. Hier wird nochmals auf das Bohr'sche Atommodell eingegangen: „Nach unserer Auffassung sollten die Schülerinnen und Schüler an dieser Stelle schon über die nötigen Grundlagen verfügen, um mit dem (ohnein schon als „Vorwissen“ präsentieren) Bohrschen Atommodell reflektiert umgehen zu können.“ (Müller, et al., p. 15).

Als nächstes werden der Franck-Hertz-Versuch demonstriert und die Quantisierung der Energie im Atom thematisiert. Die Schrödinger-Gleichung im Coulomb-Potential zu lösen, ist mithilfe des mathematischen Niveaus in der Schule nicht möglich. Man kann es jedoch mit einem Kastenpotential annähern.

3.3.2 SchülerInnenvorstellungen

Es gibt zahlreiche Schwierigkeiten für Schülerinnen und Schüler ein neues Konzept zu verstehen. Alle Schülerinnen und Schüler haben zu einem physikalischen Phänomen schon eine Vorstellung, ein Prä-Konzept. Diese können entstehen, durch eine bunte Mischung aus schulischem Vorwissen, aufgeschnappten Fachwörtern und eigenen Ideen zu selbst beobachteten Phänomenen bzw. Gedankenexperimenten. In dem Buch: „Schülervorstellungen und Physikunterricht“ von Horst Schecker, Thomas Wilhelm und Martin Hopf sind viele SchülerInnenvorstellungen gesammelt worden, die nun vorgestellt werden.

Determinismus und Wahrscheinlichkeitsdeutung

Wenn man einen Würfel würfelt lässt sich das Ergebnis nicht vorhersagen. Aber die statistische Verteilung, die sich bei häufigen Würfeln ergibt schon. Die meisten Schülerinnen und Schüler gehen davon aus, dass wenn man die genauen Anfangsbedingungen kennen würde, dann auch genaue Vorhersagen treffen könnte welche Ereignisse eintreten werden. Schülerinnen und Schüler fällt es nicht leicht den Determinismus, den sie aus der klassischen Physik gewohnt sind, loszulassen. So gibt es eine Schüleraussage die folgendes besagt: *„Und es ist jetzt halt schwer anzugeben, wo sich jetzt das Elektron genau befindet, und der Ausweg ist eben der, dass man dann auch Wahrscheinlichkeiten angeben kann: als das Elektron befindet sich mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit eben an einem gewissen Ort.“* (Schecker & et al., 2018, p. 214). In der Quantenmechanik ist der Zufall objektiver Natur und liegt nicht in der subjektiven Unkenntnis der Anfangsbedingungen. Eine andere Aussage ist: *„Also man kann eigentlich nicht unbedingt sagen, dass man ... es überhaupt nicht vorhersehen kann, es ist nicht total rein zufällig, was das Elektron macht. Aber es ist auch nicht direkt vorhersehbar. So zwischen, also in der klassischen Mechanik kann man ja genau sagen, was eine Masse, also Massenpunkt im nächsten Moment macht. Und in der Statistik kann man es überhaupt nicht mehr sagen, nur mit Wahrscheinlichkeit und dazwischen liegt irgendwo die Quantenmechanik.“* (Schecker & et al., 2018, p. 215). Von den meisten Schülerinnen und Schüler wird die Wahrscheinlichkeitsinterpretation als Hilfsmittel akzeptiert. Sie verwenden Wahrscheinlichkeit als Instrument um physikalische Probleme bearbeiten zu können. Es ist für sie vorstellbar, dass Wahrscheinlichkeiten und relative Häufigkeit zusammenhängen. Von anderen Schülerinnen und Schüler wird der Ruf nach einer Erklärung für die Wahrscheinlichkeitsverteilung, anhand von Einzelereignissen,

laut. Eine Aussage dazu ist: „*Wieso weiß das Quant denn, dass es da nicht hindarf? ... Was für einen Grund haben die Quanten, sich so zu verteilen?*“ (Schecker & et al., 2018, p. 215). Diese Schülerinnen und Schüler wünschen sich anschaulichere Begründung. Wieder andere Schülerinnen und Schüler verstehen unter Wahrscheinlichkeit die umgangssprachliche Verwendung für Ungenauigkeit und Zufälligkeit. Sie meinen, dass quantenmechanische Phänomene nicht ausreichend beschrieben werden können.

Wellen und Teilchen

Quantenmechanische Objekte haben Teilchen- und Wellencharakter. Die Schrödingergleichung ist eine Gleichung für die Wellenfunktion ψ , sie sagt das Auftreten von Interferenzphänomen bzw. Wellenverhalten vorher. Wenn eine Ortmessung durchgeführt wird, dann erhält man einen eindeutigen Aufenthaltsort. Gemäß der Born'schen Wahrscheinlichkeitsinterpretation tritt Teilchenverhalten auf. Beide Aspekte sind notwendig, um ein quantenmechanisches Objekt zu beschreiben. Es ist weder Teilchen noch Welle, sondern etwas anderes. Eine Vorstellung dazu kann der „Mal-so-mal-so-Dualismus“ sein, der zu der folgenden Aussage geführt hat: „*Das kann man sich nur erklären, wenn man das als Welle sieht. Weil wenn ich das Teilchen sehe, dann kann ich nicht verstehen, dass das Teilchen, das hier durchgeht, etwas von dem da drüben weiß.*“ (Schecker & et al., 2018, p. 215). Die meisten Schülerinnen und Schüler stellen sich Licht als Teilchen vor. Der Wellenaspekt wird unreflektiert in diese Vorstellung mitgenommen. Das kann Auswirkung haben, die dazu führen, dass Vorstellungen entstehen, wie z.B., dass Elektronen auf einer Welle sitzen und mit ihr auf- und abspringen. Wenn die Lehrkraft stehende De-Broglie-Wellen bespricht, im Zuge des quantenmechanischen Oszillators, oder im Zuge der Stabilität des Wasserstoffatoms, können sich solche Vorstellungen bei den Schülerinnen und Schülern bekräftigen.

Potenzialtopf und Quantisierung der Energie

Betrachtet man unendlich hohe Potenzialtöpfe sind stehende Wellen die Lösung der Schrödingergleichung. Gemäß der Bohr'schen Wahrscheinlichkeitsinterpretation ist das Betragsquadrat der Wellenfunktion die Wahrscheinlichkeitsdichte ein quantenmechanisches Objekt an einem Ort zu finden. Schülerinnen und Schüler deuten die stehenden Wellen so, dass sich quantenmechanische Objekte im Potenzialtopf zwischen den Wänden hin- und

herbewegen. Die Wellenausbreitung lässt sich für Schülerinnen und Schüler, scheinbar gut mit dem klassischen Bahnbegriff verbinden. Die stehende Welle wird größtenteils ignoriert. Diese Vorstellung führt zu der Aussage: *„Die Elektronen schwappen im Potenzialtopf hin und her wie Wasser in der Badewanne.“* (Schecker & et al., 2018, p. 216).

Die Energiequantisierung löst, bei Schülerinnen und Schüler, kein Erstaunen aus und wird fraglos akzeptiert. Daraus folgt, dass man die Energiequantisierung im Unterricht nicht benutzen kann, um bei den Schülerinnen und Schülern einen kognitiven Konflikt hervorzurufen, welcher Hilfreich sein kann, um alte Vorstellungen neu aufzubauen.

Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation

Es gibt mehrere SchülerInnenvorstellungen zu der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation. Die meisten Schülerinnen und Schüler meinen, dass bei Quantenobjekten Aufenthaltsort und Impuls nicht gleichzeitig genau messbar ist. Es wird davon ausgegangen, dass mit ausreichend genauen Messinstrumenten der Ort und der Impuls beliebig genau messbar sind aber nicht gleichzeitig. Bei anderen Schülerinnen und Schüler ist die Vorstellung vorherrschend, dass nur eine Messgröße beliebig genau bestimmbar ist, jedoch wenn eine bestimmt wird, kann die andere nicht beliebig genau gemessen werden. Das führt zu folgender Aussage: *„Je genauer die Ortsmessung, desto ungenauer die Impulsmessung und umgekehrt“* (Schecker & et al., 2018, p. 217). Wieder andere Schülerinnen und Schüler gehen davon aus, dass man einem Quantenobjekt nicht gleichzeitig beliebig genau einen Ort und Impuls zuschreiben kann. Eine Aussage, die in dieser Richtung getätigt wurde, lautet: *„Wenn ich einmal den Ort genau betrachte, kann ich den Impuls nicht genau bestimmen und umgekehrt. ... Ich würde nicht nur so weit gehen, das so zu interpretieren, dass man durch die Messanordnung es nur praktisch verändert, sondern dass es eine physikalische Eigenschaft unserer Welt ist, also eine grundlegende Eigenschaft unserer Welt. Ob man misst oder nicht, diese Unschärfe ist vorhanden. Ich würde es also als eine physikalische Eigenschaft unserer Welt interpretieren.“* (Schecker & et al., 2018, p. 217). Manche Schülerinnen und Schüler interpretieren die Unschärferelation so, dass es zu einem bestimmten Zeitpunkt nicht möglich ist den Aufenthaltsort eines Quantenobjekt beliebig genau zu messen. Diese Schülerinnen- und Schülervorstellungen haben gemeinsam, dass sie sich auf einzelne quantenmechanische Objekte beziehen und

nicht auf ein Ensemble derselben. Des Weiteren suggerieren diese Vorstellungen die Existenz eines wahren Ortes eines quantenmechanischen Objekts. Die Frage, was die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation aussagt, wird auch von Fachleuten nicht einheitlich beantwortet. „In den letzten Jahren hat sich weitgehend die statistische Interpretation der Quantenmechanik durchgesetzt. Hier wird die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation als Grenze für die gleichzeitige Präparierbarkeit von Ort und Impuls an Ensembles von Quantenobjekten angesehen. Bei Messungen von Ort oder Impuls ergibt sich bei jeder Einzelmessung ein bestimmter Wert. Viele Messungen ergeben statistische Verteilungen von Messwerten. Die Standardabweichung dieser statistischen Verteilungen werden mit Δx oder Δp_x bezeichnet. Die Aussage der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation ist dann, dass es nicht möglich ist, ein Ensemble von Quantenobjekten so zu präparieren, dass das Produkt von Δx und Δp_x den Wert $h/4\pi$ unterschreitet.“ (Schecker & et al., 2018, p. 218).

Bedeutung der Größen Δx und Δp_x

Viele Schülerinnen und Schüler gehen davon aus, dass Δx einen Wegzuwachs angibt: *„ Δx ist ja ´ne Ortsänderung.“* (Schecker & et al., 2018, p. 218). Bei anderen Schülerinnen und Schülern ist die Vorstellung vorherrschend, dass der wahre Wert vom gemessenen Wert um Δx abweicht: *„Ja, das ist der Abstand vom gemessenen Ort zum Ort, wo es vorher war.“* Bzw. *„Die Abweichung, wo das Teilchen wirklich war und wo es gemessen wurde.“* (Schecker & et al., 2018, p. 218). Manche Schülerinnen und Schüler meinen, dass Δx die Differenz zweier Messwerte darstellt: *„Das Teilchen hat ja immer einen Anfangsort und danach einen zweiten Ort, den Endort.“* (Schecker & et al., 2018, p. 218). Δx wird auch als kleiner Wert gedeutet: *„ Δx ist -irgendwie klein.“* *„ Δp ist ein klein gewählter - kleiner Teil vom Impuls.“* (Schecker & et al., 2018, p. 218). Die Deutung als Fehlergrenzen, als Maß für die Messungenauigkeit, findet bei einigen Schülerinnen und Schüler Anklang. Es wird auch als ein zulässiger Aufenthaltsbereich angesehen: *„Also halt – ein bestimmtes, nein, nicht bestimmtes Intervall, wo es sein könnte. Der Bereich, wo es sich aufhalten kann.“* (Schecker & et al., 2018, p. 218). Andere Schülerinnen und Schüler meinen, dass der Aufenthaltsort durch die Messung gestört wird und sich das Quantenobjekt anschließend nicht mehr an seinem eigentlichen Ort befindet. „Wiesner betont, dass kein einziger Schüler eine Interpretation von Δx und Δp als Standardabweichungen äußert und diese auf das

Ensemble bezieht – also die heute fachlich überwiegend anerkannte statistische Deutung heranzieht.“ (Schecker & et al., 2018, p. 218).

4 Unterrichtskonzept

Fachdidaktisches Basiswissen und die Ergebnisse aus den Recherchearbeiten fließen in das zu erstellende Unterrichtskonzept ein. Das Unterrichtskonzept soll den Schülerinnen und Schülern die Quantenmechanik näherbringen und führt entlang der Leitlinie, die das Skriptum von Romano Rupp aufzeigt. Dazu sind bestimmte Voraussetzungen im Physikunterricht notwendig, durch welche das Unterrichtskonzept erst umgesetzt werden kann. Das Unterrichtskonzept zielt auf die Quantenmechanik ab und setzt die klassische Mechanik und Optik voraus.

4.1 Notwendige Voraussetzungen

Den Ausgangspunkt des Unterrichtskonzepts bildet der Begriff „Zustand“. Es ist davon auszugehen, dass dieser zentrale Begriff schon im Physikunterricht gefallen und thematisiert worden ist. Dieser Begriff wird in diesem Konzept erneut aufgegriffen und seine Bedeutung genauer dargestellt. Wichtig ist die Idee, dass Licht von Schülerinnen und Schülern als Teilchenstrahlung angesehen wird. Auf diese Weise ist es möglich, den Begriff der „Wellenfunktion“ nicht zu verwenden, wobei die Hoffnung besteht, dass bekannte SchülerInnenvorstellungen zum Thema Welle und Teilchen, wie sie im Kapitel 3.3.2 besprochen werden, nicht von den Schülerinnen und Schülern gebildet werden. An diesem Punkt in ihrer schulischen Ausbildung sollte den Schülerinnen und Schülern auch geläufig sein, was eine Kausalitätskette ist und was der Begriff „Determinismus“ bedeutet. In der klassischen Physik wird am Determinismus nicht gerüttelt. Den Schülerinnen und Schülern werden die Annahmen der klassischen Physik zuerst vor Augen geführt und Schritt für Schritt werden sie dazu gebracht, den Determinismus, wie er in der klassischen Physik vorherrscht, loszulassen. Dazu wird vorausgesetzt, dass die Schülerinnen und Schüler mit dem Begriff „Wahrscheinlichkeit“ aus dem Mathematikunterricht bereits vertraut sind. Im Kapitel 3.3.2 über Schülerinnen- und Schülervorstellungen werden Vorstellungen beschrieben, die zeigen, dass es Schülerinnen und Schüler nicht leichtfällt den objektiven Zufall, wie er in der modernen Physik existiert, anzunehmen und zu akzeptieren. Ein Wechsel des Konzepts muss vollzogen werden.

4.2 Begriffe in der Quantenphysik

In der klassischen Physik haben viele Variablen ein kontinuierliches Wertespektrum. In der modernen Physik sind diese aber diskret. Dieses Phänomen nennt man *Diskretisierung*, wie zum Beispiel die Quantisierung der Energie. Bestimmte Systeme können Energie nur noch als Pakete (Quanten) auf- und abgeben. Aber als Quanten werden auch Objekte bezeichnet, welche Masse, Energie und Impuls haben (Lichtquanten). Der Begriff „Quant“ überschneidet sich hier mit dem Teilchenbegriff.

Doch die Begriffe „Quantisierung“ oder „Quant“ sind nicht ausschlaggebend für die Quantenphysik. Viel wichtiger ist, dass im Rahmen der Quantenphysik eine deterministische Beschreibung des Naturgeschehens nicht möglich ist. Um diesen zentralen Unterschied hervorzuheben, kann man den Counterpart zur klassischen Physik als *moderne Physik* bezeichnen. (Rupp, 2019, p. 186)

Viele einführende Lehrbücher verwenden Begriffe wie Materiewelle, Welle-Teilchen-Dualismus und darauf aufbauend die Wellenlänge von Wahrscheinlichkeitswellen oder auch Korrespondenzbeziehungen wie $E = h\nu$, welche eine Beziehung zwischen der Teilchenenergie E und der Frequenz ν der „Materiewelle“ über das Planck'sche Wirkungsquantum h herstellen. Dies sind Relikte aus den Anfängen der Quantentheorie, als die Theorie noch in den Kinderschuhen steckte. Der Ausdruck „Welle-Teilchen-Dualismus“ vernebelt mehr, als er aufklärt. (Rupp, 2019, p. 186)

Die Deutung der Ergebnisse und der mathematische Formalismus sind heutzutage unumstritten, aber zur philosophischen Interpretation existieren verschiedene Deutungen.

4.3 Historischer Hintergrund zu dem Begriff „Substanz“

In der klassischen Naturphilosophie war „Substanz“ zuerst ein Ausdruck für das Wesentliche, Bleibende und Unzerstörbare. Bis ins 17. Jahrhundert waren Substanz und Gott praktisch synonyme Begriffe. Aufgrund der Massenerhaltung wurde Substanz schließlich zum Synonym für Materie. Schopenhauer spricht darüber so, dass die Form des Körpers verschwinde, jedoch die Substanz, die Materie, immer noch irgendwo anzutreffen sei. Der komplementäre Begriff zu „Substanz“ ist „Zustand“, der laut Schopenhauer eine Verbindung zum Determinismus bzw. Kausalität hat. Aus dem Gesetz der Kausalität folgt das

Gesetz der Trägheit. Der Trägheitssatz besagt, dass jeder Körper in einer gleichförmigen Geschwindigkeit oder in Ruhe verharrt, wenn keine äußere Kraft auf den Körper wirkt. Das bedeutet, dass die Bewegung (oder Ruhe) bis ins Unendliche fort dauert, wenn keine Ursache (äußere Kraft) hinzutritt und den Zustand ändert. Aus dem Gesetz der Kausalität folgt aber auch das Gesetz der Beharrlichkeit der Substanz, welches die Ewigkeit der Materie ausspricht. Denn das Gesetz der Kausalität geht immer nur auf die Zustände (Ruhe, Bewegung, Form, Qualität) der Körper ein, aber nicht auf das Dasein des Trägers aller Zustände, der Materie. (Rupp, 2019, p. 187).

4.4 Zustand in der klassischen Mechanik

Zu Beginn des Unterrichtskonzepts wird den Schülerinnen und Schülern der Begriff „Zustand“, wie er in der klassischen Physik Verwendung findet, in Erinnerung gerufen. Anschließend wird das Wissen der Schülerinnen und Schüler vertieft und verfeinert, dass es ihnen leichter fällt, den quantenmechanischen Informationszustand vom klassischen Zustand abzugrenzen.

Photonen, Elektronen usw. erkennt man an ihren substanziellen Eigenschaften, die relativistisch invariant sein müssen, zum Beispiel Masse oder Ladung. Diese fallen unter den Substanzbegriff. Wandelbare Eigenschaften kennzeichnen den Zustand (Bewegung, Form). Die Substanz ist der unveränderliche Träger der Zustände. In der Mechanik ist die Substanz der Punktteilchen die Masse m . Im Rahmen der Mechanik ist der Zustand eines Teilchens vollkommen wiedergegeben durch den Aufenthaltsort $\vec{x}$ und dem Impuls $\vec{p}$. In der klassischen Mechanik ist es theoretisch möglich, den Zustand eines Punktteilchens exakt zu bestimmen, da die Messunsicherheit null werden kann. Es wird davon ausgegangen, dass Ort und Impuls eines Teilchens zugleich Elemente der Realität sind, also dass ein Teilchen zu jedem Zeitpunkt einen eindeutigen Aufenthaltsort und Impuls besitzt. Dementsprechend ist es unbedeutend, ob zuerst der Ort oder der Impuls gemessen wird. Das Ergebnis ist dasselbe, weil das Teilchen gleichzeitig einen Ort und einen Impuls *hat*. In der Praxis treten aufgrund von Unzulänglichkeiten beim Messvorgang Messunsicherheiten auf.

4.5 Der Determinismus der klassischen Physik

Die Bedeutung und Tragweite der Kausalität und des klassischen Determinismus werden besprochen. Es ist davon auszugehen, dass die Schülerinnen und Schüler im Rahmen ihrer Ausbildung in der klassischen Physik mit der Idee des

Determinismus ausreichend vertraut sind. Wie im Kapitel 3.3.2 vorgestellt, ist eine gängige Schülerinnenvorstellung, dass es vielen Schülerinnen und Schülern nicht leichtfällt, den Determinismus, den sie in der klassischen Physik gewohnt sind, loszulassen. Der kognitive Konflikt ist an dieser Stelle wünschenswert und hilfreich, um einen Konzeptwechsel zu vollziehen.

Aus dem Gesetz der Kausalität folgt nach Schopenhauer, dass es keine Zustandsänderung oder Wirkung ohne Ursache geben kann. Das bedeutet, dass aus einem eindeutig bestimmten Ausgangszustand nach einem kausalen Prozess ein *eindeutiger* Endzustand folgt. Hier kann von Zufall nicht gesprochen werden. Wenn alle Kräfte bekannt sind und zu einem beliebigen Zeitpunkt der Zustand (Ort, Impuls) eines Teilchens exakt bestimmt ist, können mithilfe der Bewegungsgleichungen alle Zustände zu jedem beliebigen Zeitpunkt in der Zukunft und Vergangenheit ermittelt werden.

In der klassischen Physik sind der Genauigkeit und Vollständigkeit des Anfangszustands keine Grenzen gesetzt. Ursachen und Folgen sind eindeutig durch Naturgesetze kausal miteinander verknüpft. Deswegen ist die Zeitentwicklung deterministisch und daher ist die einzig mögliche Weltanschauung der klassischen Physik der *Determinismus*. Die Grundlage der klassischen Physik bilden:

1. Vollständige und exakte Kenntnis des Ausgangszustands.
2. Das Kausalitätsprinzip.

Der französische Physiker Pierre-Simon Laplace hat die deterministische Weltanschauung der klassischen Physik durch einen Weltgeist illustriert. Der sogenannte Laplace-Dämon könnte Zukunft und Vergangenheit bis ins kleinste Detail exakt beschreiben, wenn er alle Zustände und Kräfte zu einem Zeitpunkt wüsste.

4.6 Kritik an der deterministischen klassischen Physik

Die Kritik von Engels ist äußerst hilfreich, um darzustellen, dass der Determinismus nicht beweisbar und nur eine Annahme der klassischen Physik ist. Auf diese Weise kann ein Konzeptwechsel leichter vollzogen werden. Die statistische Physik wird als ein Beispiel herangezogen, um zu zeigen, dass die klassische Physik nicht auf statistische Größen wie Entropie und Temperatur verzichten kann.

Es werden gegen Ende des 19. Jahrhunderts auch kritische Ansichten mitgeteilt, wie zum Beispiel Friedrich Engels der Meinung ist, dass die Wissenschaft den Zufall auszuschließen sucht, indem sie ihn gleich ganz leugnet. „Dass mich vorige Nacht ein Floh um vier Uhr morgens gebissen hat und nicht um drei oder fünf, und zwar auf die rechte Schulter, nicht aber auf die linke Wade, alles das sind Tatsachen, die durch eine unverrückte Verkettung von Ursache und Wirkung, durch eine unerschütterliche Notwendigkeit hervorgebracht sind, so zwar, dass diese Ereignisse sich so und nicht anders zutragen mussten.“ (Dialektik der Natur, Engels, 1883) Die klassische Physik kann zwar nicht vorhersagen wann, wo oder wie viele Flöhe zubeißen, aber sie geht davon aus, dass die Information zu jedem Zeitpunkt prinzipiell vorhanden ist, aber aufgrund von nicht ausreichender Messgenauigkeit nicht abrufbar ist. Wenn die Ursache schon in der ursprünglichen Konstitution des Sonnensystems vorhanden war, gibt es den Zufall nicht. Jedoch lässt sich das nicht beweisen, da eine vollständige und exakte Kenntnis des Anfangszustandes nicht möglich ist. Engels zeigt auf, dass man in der klassischen Physik nur davon ausgeht, dass der Zufall nicht existiert.

Der „Zufall“ findet jedoch seinen Weg zurück in die klassische Physik, erstens durch das Vielteilchenproblem, bei dem sogar moderne Supercomputer daran scheitern, aus gegebenen Anfangsbedingungen von gigantisch vielen Teilchen etwas Sinnvolles zu berechnen. Das Problem wird mit makroskopischen Begriffen (Entropie, Temperatur) in der statistischen Thermodynamik behandelt. Zweitens wird, wenn ein Problem aus hochempfindlichen Abhängigkeiten von den Anfangsbedingungen hervorgeht, die scheinbare Zufälligkeit des Systems von der Chaosforschung untersucht.

4.7 Die Zustandsbestimmung für quantenmechanische Objekte

Um den quantenmechanischen Informationszustand einzuführen, wird eine Reihe von Experimenten gemacht, die im schulischen Rahmen wahrscheinlich am leichtesten mit einem Laser realisierbar sind. Sie dienen dazu, um zu illustrieren, dass die Zustandsbestimmung nicht so einfach ist, wie es in der klassischen Physik suggeriert wird, und als Denkanstoß für die Schülerinnen und Schüler.

Die deterministische Weltsicht der klassischen Physik wird weder von der statistischen Thermodynamik noch von der Chaostheorie verworfen. Im Rahmen von quantenmechanischem Phänomen tritt jedoch ein universeller Zufall auf, der nichts mit der Unkenntnis von Anfangsbedingungen zu tun hat, sondern in der

Natur selbst liegt. Daher fällt die von der klassischen Physik angenommene Kausalitätskette in sich zusammen, da es laut der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation prinzipiell nicht möglich ist, den Aufenthaltsort und den Impuls eines Teilchens zu einem Zeitpunkt genau zu bestimmen und daher auch den genauen Zustand eines Teilchens. Daher ist es auch prinzipiell unmöglich, mittels einer Kausalitätskette zu einer Ursache eines Zustandes zu gelangen. Albert Einstein hat sich immer bemüht, gegen eine mögliche philosophische Anschauung zu arbeiten, die besagt, dass die Natur nicht mathematisch beschreibbar ist. Mittlerweile hat die Physik jedoch, gelernt mit den Konsequenzen der Unbestimmtheitsrelation zurecht zu kommen.

4.8 Experimente zur Bestimmung des Zustandes

Es werden Demonstrationsexperimente vorgestellt, in denen versucht wird, den Zustand (Ort, Impuls) eines Teilchens möglichst exakt zu bestimmen und die Messunsicherheit von Ort und Impuls *gemeinsam* verschwinden zu lassen. Es werden Photonen benützt, aber es funktioniert genauso gut mit Elektronen, Atomen oder Molekülen. Jedoch ist der Aufwand bei Photonen deutlich geringer. Als Photonenquelle dient ein Laser, der grünes Licht emittiert. Seine Strahlung ist für dieses Experiment ausreichend intensiv und monochromatisch. Photonen Energie: $E \approx 2.5\text{eV} \approx 4 \cdot 10^{-19}\text{J}$ und daher: $p \approx E/c \approx 1 \cdot 10^{-27}\text{kg m/s}$.

Für den konkreten Schulunterricht können die folgenden Experimente gemäß der verfügbaren Materialien vereinfacht werden. Es handelt sich um Experimente, die mithilfe eines Lasers, eines verstellbaren Spalts, einer Linse und eines Schirms durchgeführt werden können. Ziel dieser Experimente ist es, zu zeigen, dass jeder Versuch, die Aufenthaltsgenauigkeit über die Breite des Spaltes zu erhöhen, unweigerlich zu einem Verlust der Genauigkeit des Impulses führt und vice versa. Es empfiehlt sich im weiteren Verlauf, genau darauf einzugehen, was mit den Größen Δx und Δp genau gemeint ist, da aus dem Kapitel 3.3.2 hervorgeht, dass es verschiedene Schülervorstellungen zu diesen Größen gibt. Eine Idee wäre es auch, auf ein computergestütztes Simulationsexperiment zurückzugreifen, welches der Lehrkraft erlaubt die laufende Simulation zu pausieren und Schülerinnen und Schüler raten zu lassen, an welcher Stelle am Schirm das nächste quantenmechanische Objekt auftreffen wird.

4.8.1 Erstes Experiment

Unmittelbar am Ausgang des Lasers wird, in einer Ebene senkrecht zur Strahlrichtung, die Verteilung der Photonen untersucht (Δx). Die Intensitätsverteilung wird gemessen, indem man diese Ebene, z.B. mit einer Linse, stark vergrößert auf einem Schirm abbildet. Die Ortsverteilung erweist sich in guter Näherung als eine Gaußverteilung, die Standardabweichung senkrecht zur Strahlachse wird $\Delta x_{\perp}$ bezeichnet. Möchte man die Impulskomponentenverteilung (Δp) senkrecht zur Strahlachse betrachten, kann man auf die Intensitätsverteilung auf einem ca. $L = 10\text{ m}$ entfernten Schirm zurückgreifen. Diese entspricht wieder in guter Näherung einer Gaußverteilung. Die Strahldivergenz $\Delta\alpha$ lässt sich aus dieser Verteilung abschätzen (unter Berücksichtigung der Strahlbreite unmittelbar am Ausgang des Lasers (bei einem Laser: Größenordnung Millirad)). Die Breite der Impulsverteilung senkrecht zur Strahlachse lässt sich ableiten aus $\Delta p_{\perp} \approx p\Delta\alpha$. Das Produkt der beiden Standardabweichungen dient als Maß für die Unsicherheit über die Kenntnis des Zustands der Photonen. In diesem Demonstrationsexperiment ergibt sich ein Wert in der Größenordnung von: $\Delta x_{\perp}\Delta p_{\perp} \approx 10^{-34}\text{ Js}$.

4.8.2 Zweites Experiment

Nun wird untersucht, ob man eine der beiden Unsicherheiten verkleinern kann. Wird mit der Ortsunschärfe begonnen, kann unmittelbar vor dem Ausgang des Lasers eine Schieblehre in den Strahlengang eingesetzt werden. Auf diese Art weiß man genauer, an welchem Ort sich die Photonen befinden, je kleiner die Spaltbreite ist. Die Spaltbreite kann mit der Schieblehre abgeschätzt werden. Wenn der Durchmesser des Strahls sehr viel kleiner als der Backenabstands der Schieblehre ist, kann die Ortsverteilung grob als rechteckförmig angesehen werden. Daraus folgt, dass die Ortsverteilungsfunktion der Teilchen keine Gaußverteilung mehr ist, sondern eine Rechteckverteilung. Die Photonen sind annähernd gleichmäßig verteilt. Die Ortsunsicherheit Δx ist ungefähr die Breite der Spaltblende. Die Impulsverteilung, die man auf dem $L \approx 10\text{ m}$ entfernten Schirm betrachten kann, ist ebenfalls keine Gaußverteilung mehr. Die Impulsverteilung stellt sich als eine Intensitätsverteilung mit einem zentralen Maximum in x-Richtung dar, die symmetrisch dazu Nebenmaxima aufweist. Daher gilt: Wird eine der Verteilungsfunktionen verändert, so ändert sich auch die andere.

4.8.3 Drittes Experiment

Man kann die Skalierung der rechteckigen Ortsverteilung ändern, indem man die Breite der Rechteckblende variiert. Die Skalierung ändert sich um einen Faktor s_x . Die Form der Impulsverteilung bleibt gleich, aber auch ihre Skalierung ändert sich. Es gibt einen funktionalen Zusammenhang zwischen dem Skalierungsfaktor der Impulsverteilung s_p und der Ortsverteilung s_x . Die Verteilungsfunktionen der Zufallsverteilungen sind in gesetzmäßiger Weise miteinander korreliert.

4.8.4 Viertes Experiment

Es wird untersucht, wie sich die Unschärfen verändern, wenn man verschiedene Einstellungen wählt. Die Impulsunsicherheit sei abgeschätzt mit dem Abstand der Nullstellen des zentralen Maximums Δp_x , die geschätzte gemeinsame Unkenntnis des Zustandes des Photons sei Δx . Es wird mit einem beliebigen Backenabstand Δx_0 begonnen und dem resultierenden Δp_{x0} . Werden andere Einstellungen vorgenommen, kommt man zu diesem Ergebnis:

$$\Delta x \Delta p_x = s_x s_p \Delta x_0 \Delta p_{x0}.$$

Das Interessante hierbei ist, dass das Produkt der Skalierungsfaktoren für jede beliebige Einstellung: $s_x s_p = 1$ ist. Insbesondere gilt:

$$\Delta x \Delta p_x = \text{const.} \neq 0.$$

Das bedeutet: Wird beispielsweise die Ortskenntnis um den Faktor s_x verbessert, dann verstärkt sich die Unkenntnis des Impulszustandes $s_y = 1/s_x$ gerade so, dass das Produkt gleich eins ist. Daraus folgt, dass eine Größe, beispielsweise Δx , beliebig klein werden kann, jedoch dabei Δp_x entsprechend größer wird, sodass das Produkt konstant bleibt. Ferner ist weder $\Delta x = 0$ noch $\Delta p_x = 0$ möglich. Wird für die Breite der Impulsverteilung der Abstand der beiden Minima um das zentrale Maximum gewählt, so erhält man im Experiment einen Wert von: $\Delta x \Delta p_x \approx 6 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$.

4.8.5 Fünftes Experiment

Um die Messunschärfen genauer miteinander zu vergleichen, werden sie untersucht, wenn beide Verteilungen gaußförmig sind. Dann können auch die Standardabweichungen der beiden Gaußfunktionen als Maß für die Unschärfen Δx und Δp_x herangezogen werden. Langjährige Experimente ergaben eine unverrückbare untere Schranke:

$$\Delta x \Delta p_x > 0.5 \cdot 10^{-34} \text{Js}.$$

4.9 Die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation

Die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation wird von der Lehrkraft als Ergebnis der vorangegangenen Experimente präsentiert und die Folgerungen für den Zustand eines Objekts in der klassischen Physik werden gemeinsam mit den Schülerinnen und Schülern erarbeitet. Darauf aufbauend wird das Ende der klassischen Weltsicht eingeläutet und Basis für eine neue physikalische Theorie gelegt.

Dieses Experiment wurde in mehr als hundert Jahren genauestens geprüft und in vielfachen Abwandlungen variiert. Sie führten alle zu demselben Ergebnis, dass Ort und Impuls eines Photons nicht gleichzeitig beliebig genau messbar sind. Erreicht man eine Präzisierung des Aufenthaltsortes, wird die Kenntnis des Impulses verringert. Es gibt mehrere Möglichkeiten, diese experimentellen Befunde einzuordnen. Dieses Ergebnis könnte nur für diese Art von Experiment und jene, die darauf aufbauen gelten; es kann sich hierbei um ein Phänomen handeln, welches nur Photonen betrifft, oder es ist ein Naturphänomen, welches allgemeine Gültigkeit besitzt. In den letzten hundert Jahren sind immer wieder Experimente dazu durchgeführt worden. Alle haben ausnahmslos bestätigt, dass der Aufenthaltsort und Impuls eines Teilchens oder Systems nicht gleichzeitig, beliebig genau gemessen werden können. Dadurch ist die klassische Physik in ihre Schranken verwiesen worden.

Alle Experimente bestätigen: *Die Grundannahme der klassischen Physik, man könne den mechanischen Zustand eines Teilchens exakt festlegen, ist falsch.*

Gegen Ende des 19. Jahrhunderts ist der Physik das Paradigma eines deterministischen Weltbildes verloren gegangen. Die klassische Physik wird durch die moderne Physik abgelöst, die auf dem fundamentalen Prinzip, des Heisenbergschen Unbestimmtheitsprinzips aufbaut.

Die Heisenbergsches Unbestimmtheitsprinzip besagt, dass die vollständige und exakte Kenntnis des mechanischen Zustands unmöglich ist.

Wenn man möglichst nahe an den klassischen Grenzfall herankommen möchte und daher Ort und Impuls gleichzeitig möglichst genau zu bestimmen versucht, tritt eine Gaußverteilung auf. Es zeigt sich, dass das Minimum des Produktes der Orts-

und Impulsunschärfe für alle Teilchen und Systeme exakt denselben Wert hat. Die Heisenbergsche Unschärferelation ergibt sich zu

$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar/2.$$

Mit $\hbar$ der Dirac-Konstante, deren Wert: $\hbar = 1.0 \cdot 10^{-34} \text{Js}$ beträgt. Wird eine zweite Blende benutzt, um die y -Richtung zu untersuchen, stellt sich heraus, dass die Heisenbergsche Unschärferelation für jede Koordinate gilt. Da das Heisenbergsche Unschärfeprinzip allgemeingültig ist, muss die klassische Physik abdanken und eine neue Theorie muss aufgebaut werden, um sie zu ersetzen. Die Quantentheorie baut auf dem Unschärfeprinzip auf. Die Quantentheorie und die Relativitätstheorie bilden gemeinsam die zwei fundamentalen Metatheorien der Physik. Jede physikalische Theorie muss den Anforderungen dieser beiden Metatheorien genügen. Die klassische Physik ist in der Quantenphysik als Grenzfall enthalten, für $\hbar \rightarrow 0$. Genauso ist sie auch in der Relativitätstheorie enthalten, wenn $c \rightarrow \infty$.

4.10 Das Ding an sich

Für Schülerinnen und Schüler kann die Idee Kants von einem „Ding an sich“ sehr hilfreich sein, um zwischen der Information über ein Objekt und dem Objekt selbst unterscheiden zu können. Diese Spitzfindigkeit ist notwendig, um die klassische Ansicht hinter sich zu lassen und sich auf eine neue Theorie einzulassen, die die Wirklichkeit angemessener zu beschreiben versteht.

Die physikalische Weltanschauung hat sich aufgrund der Heisenbergschen Unschärferelation verändert. In der klassischen Physik war es bekannt, dass es für das Erkennen der Realität Einschränkungen gibt. Schon Kant schreibt über das sogenannte „Ding an sich“, über die Realität eines Dings. Es existieren Dinge, die außerhalb von uns sind, wir können diese über unsere Sinne wahrnehmen, daher haben wir eine Vorstellung über dieses Ding, aber „was sie an sich selbst sein mögen“, was sie in sich selbst sind, ist uns unbekannt. Wir geben diesen Dingen Namen, welche die Erscheinung dieses unbekannten (aber wirklichen) Gegenstandes bezeichnen. Nach Kant weiß man nichts über das Wesen eines Dings außer das, was uns durch die von ihm hervorgerufene Erscheinung bzw. Sinneserfahrung gegeben ist.

4.11 Der Messprozess

Durch das Auge kann man die Ortsposition eines Körpers feststellen. Heutzutage wird das Auge durch Messapparate verbessert. Der Wert vieler Messgrößen wird

als Position eines Zeigerausschlags auf einem Messinstrument abgelesen. So kann der Zustand eines Körpers als eine indirekt sinnlich erfahrene Erscheinung dem Objekt zugeordnet werden. In der klassischen Physik geht man davon aus, dass die Erscheinungen fixe Attribute des Körpers sind. Weil sie fix sind, muss es aber auch unwesentlich sein, in welcher Reihenfolge man sie misst. Es kann daher auch keine Einschränkung für die simultane Messunsicherheit aller Attribute geben. Der Zustand eines Objekts wird durch die Menge der Attribute des Objekts als physikalisch zugängliche Realität fixiert. Das *Ding an sich* ist uns nur als die Menge seiner Zustände, die erfahrbar sind, als wirklicher Gegenstand bekannt. Ein *wirklicher* Gegenstand bedeutet, dass er auf unsere Sinne direkt oder indirekt *wirkt*. Das bedeutet „*Wirklichkeit*“. Die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation verbietet nicht nur die exakte Kenntnis zweier Attribute zu einem Zeitpunkt, sondern es ist auch völlig unmöglich, dass ein Objekt einen bestimmten Impuls hat oder sich an einem bestimmten Ort befindet, da sie weder $\Delta x = 0$ noch $\Delta p = 0$ zulässt. Wenn man sich nun dem Begriff des Zustandes zuwendet, gibt es interessante Konsequenzen. Im Rahmen der klassischen Physik ist der Zustand eines Objektes im Prinzip, wenn auch nicht praktisch, genau feststellbar. Unabhängig davon, ob man den Zustand gemessen hat oder nicht, besitzt jedes Objekt einen genauen Zustand. Zustand ist Teil der physikalisch erfahrbaren Realität. Aufgrund der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation ist es nicht mehr möglich, von dem Zustand eines Teilchens oder eines Systems zu sprechen, da es nicht mehr möglich ist den Zustand festzustellen (ohne einer gewissen naturgegebenen Orts- bzw. Impulsunsicherheit) beziehungsweise er eigentlich gar nicht festgelegt ist. Daher ist der Zustand auch nicht mehr Teil der erfahrbaren physikalischen Realität. Ein Teilchen *hat* keinen Impuls und es *hat* keinen Ort, an dem es ist. Es sind nur statistische Aussagen über Impuls- und Ortsmessungen möglich. Jede physikalische Theorie muss sich daran halten, dass die Unschärferelation eine Schranke für die Information angibt, was man über ein Teilchen wissen kann. *Ferner kann man Informationen über den Ausgang von Messungen am Objekt haben, aber keine über das Objekt selbst.* Jede Theorie hat demnach nur Informationen, die aus dem Messprozess hervorgehen, als Elemente, ohne etwas über die Objekte selbst sagen zu wollen. Die Quantenmechanik entwickelt ein Kalkül über die Informationsmenge. Die Philosophie der Quantenmechanik sagt aus, dass unsere Sinne bzw. Messgeräte Informationen über den Ausgang eines Experimentes liefern. Nur mit diesen Informationen kann

man arbeiten und nur über diese kann man Aussagen treffen, daher sind auch nur jene Elemente der Quantentheorie. Mit anderen Worten:

*Jede Theorie kann nur eine Theorie über
die uns erfahrbaren Informationen sein.*

Die klassische Physik geht davon aus, aus den Informationen unwandelbare Attribute des *Dings an sich* zu erfahren. Die Quantentheorie hat diesen Anspruch notgedrungen losgelassen. Die Quantentheorie ist in der Lage, die zeitliche Entwicklung von Informationen deterministisch vorherzusagen, im Gegensatz zur klassischen Physik, die meinte, die zeitliche Entwicklung von wahren Eigenschaften der Dinge vorhersagen zu können. Der Begriff „Zustand“ sollte am besten ganz gemieden werden. Viele Lehrbücher verwenden den Ausdruck „quantenmechanischer Zustand“. Hier wird lieber von einem Informationsstand oder Informationszustand gesprochen.

4.12 Naturgegebener Zufall

Im Rahmen der klassischen Physik wird davon ausgegangen, dass man mit angemessenen Messinstrumenten die Messunsicherheit sowohl für Orts- als auch für die Impulsmessungen beliebig verkleinern lässt. Theoretisch wäre es möglich, mit solchen Messinstrumenten den mechanischen Zustand von Teilchen exakt bestimmen zu können. Auf Grund der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation ist es aber nicht möglich, bis zu einer gewissen kleinsten gemeinsamen Messunsicherheit vorzudringen. Die *Natur* selbst setzt eine gegebene untere Schranke für die Messunsicherheit fest. Seit mehr als hundert Jahren ist es niemandem gelungen, dafür eine Ursache anzugeben. An dieser Stelle haben die Physiker resigniert und eine Theorie aufgebaut, die auf diesem Naturphänomen beruht. Albert Einstein hat zeit seines Lebens immer wieder versucht, an diesem Punkt anzusetzen, um wieder zur klassischen Naturanschauung zurückzukehren. Er meinte, dass eine innere Variable, die die Zufallseignisse steuert, existiert und übersehen wurde. Die Kopenhagener Deutung der Quantenphysik geht aber davon aus, dass der Zufall der Messergebnisse nicht aus einem Mangel der Messapparate oder einer unvollkommenen Kenntnis der Anfangsbedingungen hervorgeht, sondern der Natur selbst zu eigen ist. Es gibt keine Kontrollparameter, die darüber entscheiden, welche Messwerte im Rahmen eines gewissen Unsicherheitsintervalls realisiert werden. Wird die Verteilung der Photonen auf das Intervall Δx beschränkt,

ist die Verteilung der Photonen auf das Intervall Δp_x der Impulswerte stets zufällig, wie das für Messunsicherheit auch zu erwarten ist. Die Zufälligkeit lässt sich auch z.B. zeigen, wenn man die Lichtintensität so verringert, dass nur ein Photon unterwegs ist. Aber auch für andere Teilchen lassen sich Aussagen machen, welche die Zufälligkeit demonstrieren. Man kommt zu dem Schluss, dass sich über das individuelle Schicksal eines Teilchens keine eindeutige deterministische Aussage machen lässt. Alles, das man vor dem Messprozess über das System maximal wissen kann, führt nicht mehr zu einem eindeutigen Ausgang des Experiments. Der Begriff des Zustandes ist nicht mehr haltbar und damit ebenso der Determinismus und auch das klassische Verständnis der Kausalität muss sich verändern. Quantenmechanisch betrachtet sind die Informationen, die man aus einer Messung erhält, ein Zufallsprodukt. Daher kann man einer Folge keine eindeutige Ursache zuordnen und umgekehrt. Die Physiker standen vor dem Problem, wie man eine Theorie aufbauen kann, die den Zufall als unvermeidbare Größe akzeptiert und die klassische Idee der Kausalität aufgibt. Quantenmechanisch kann man zwar keine Kausalitätskette für ein einzelnes Teilchen aufstellen, aber für statistische Größen wie *Wahrscheinlichkeitsverteilungen*, *Erwartungswerte* und *Standardabweichungen* schon. Diese Größen gehen aus den Experimenten hervor. Die Quantentheorie macht deterministische Aussagen über diese statistischen Größen.

4.13 Beugung und Interferenz

Das Ende des Unterrichtskonzepts bilden verschiedene Experimente zur Beugung und Interferenz. Schülerinnen und Schüler haben Licht als Teilchen kennengelernt und beschrieben. Bei Beugungsexperimenten werden die Messunsicherheiten bezüglich des Orts von Teilchen vorgegeben und die Folgen für den Impuls untersucht. Wenn eine bestimmte Impulsverteilung vorgegeben wird und die Ortsverteilung analysiert wird, spricht man von einem Interferenzexperiment. Diese historisch bedingten Bezeichnungen sind aus einer Zeit, als man diese Phänomene noch für klassische Wellenphänomene hielt. Nachdem Schülerinnen und Schüler die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation und ihre Folgerungen für den quantenmechanischen Informationszustand kennengelernt haben, sind sie vorrausichtlich in der Lage, die abschließenden Beugungs- und Interferenzphänomene selbstständig zu beschreiben und zu interpretieren. Falls die schulische Ausstattung es ermöglicht, empfiehlt sich ein Experiment mit

Elektronen oder Neutronen, um Schülerinnen und Schüler die Quantenmechanik auch aus einem größeren Blickwinkel betrachten zu lassen.

4.13.1 Beugung

Beugung lässt sich mit vielen unterschiedlichen Teilchenarten durchführen. Im Unterricht werden Demonstrationsexperimente zur Fraunhoferschen Beugung meistens mit Photonen im sichtbaren Energiebereich durchgeführt. Ziel ist es den quantenmechanischen Zusammenhang zwischen der Verteilungsfunktion für den Ort und den Impuls anschaulich zu machen. Es werden Teilchen vorbereitet, welche eine möglichst enge Energie- und Impulsverteilung haben. Die zeitliche Entwicklung des Schwerpunktes der Teilchenverteilung sei entlang der z -Achse. Durch Blenden bzw. Spalten bei $z = 0$ wird die Ortsverteilung eingestellt. Auf einem Schirm, der in sehr großer Entfernung von der Blende steht, kann die Impulsverteilung untersucht werden. Ideal sollte der Schirm im Unendlichen stehen, aber es ist auch möglich, eine Linse zu verwenden und den Schirm in der Brennebene der Linse zu betrachten. Wird ein Laser verwendet, dann ist die Strahlung im Allgemeinen hinreichend monochromatisch und kollimiert, also kohärent. Wenn man dieses Experiment mit einer anderen Teilchenquelle durchführen möchte, kann man verschiedene Maßnahmen ergreifen, welche die Teilchen ausreichend ununterscheidbar präparieren. Die Impulsverteilung tritt unmittelbar an der Blende bei $z = 0$ auf. Die Impulsverteilung ist die unmittelbare Folge der eingestellten Ortsverteilung. Auf dem in einem weit entfernten Abstand aufgestelltem Schirm lässt sich die Zufallsverteilung der Photonen auf die Impulse beobachten.

Interessante Experimente sind die Beugung am Spalt, am Doppelspalt oder an N Spalten.

4.13.2 Interferenz

Um Experimente zur Interferenz zu betrachten seien Teilchen in zwei Teilchenstrahlen aufgeteilt, sodass man bei einer Messung des Impulses mit gleicher Wahrscheinlichkeit einen Impuls p_a oder einen Impuls p_b erhält. Wenn die beiden Teilchenstrahlen zusammengeführt werden und sich überlagern, sollte eine Messapparatur so beschaffen sein, dass sie nicht feststellen kann welchen Impuls das Teilchen hat, sondern diesen nur registrieren. Die Informationssituation bezüglich des Impulses ist daher relativ unbestimmt. In Bezug auf die Informationssituation des Aufenthaltsortes kann beobachtet werden, dass Teilchen

an gewissen Orten gehäufte anzutreffen sind als an anderen. Dieses Phänomen wird als Interferenz bezeichnet. Durch Interferenz ist die Ortsinformation relativ bekannt. Man kann durch eine Verteilungsfunktion angeben, an welchen Orten Teilchen mit höherer oder niedriger Wahrscheinlichkeit gemessen werden. Die Interferenz ist ein Effekt, der sich aus der gemeinsamen Unbestimmtheit von Ort und Impuls ergibt.

Experimente zur Interferenz sind das Michelson-Interferometer und das Neutroneninterferometer.

4.14 Praktischer Schulunterricht

Auf dem vorgestellten Unterrichtskonzept kann für den praktischen Schulunterricht aufgebaut werden. Es ist ein Konzept, welches für den praxisorientierten Physikunterricht eine Richtlinie darstellt und im Detail noch weiter ausgearbeitet werden muss. Auf Basis des erstellten Unterrichtskonzeptes werden Stundenplanungen vorgestellt. Die konkrete Umsetzung hängt von den schulischen Rahmenbedingungen ab. Auf Basis allgemeiner physikdidaktischen Grundlagen wird das Unterrichtskonzept weiter ausgearbeitet. Verschiedene Unterrichtsmethoden werden vorgestellt, die Eignung für das konkrete Konzept besprochen und in die Stundenplanung einbezogen.

4.14.1 Schulische Rahmenbedingungen

Das Unterrichtskonzept baut darauf auf, dass Licht als Teilchen angesehen wird und Interferenz- und Beugungsphänomene quantenmechanisch, mit Hilfe der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation, erläutert werden. Auf diese Weise kann SchülerInnenvorstellungen vorgebeugt werden, die sich auf den veralteten Welle-Teilchen-Dualismus beziehen. Allerdings sieht der Lehrplan der Oberstufe für das Wintersemester der 7. Klasse elektromagnetische Wellen vor. Daher wird dieses Kapitel vor der modernen Physik besprochen. Um den Schülerinnen und Schülern den Konzeptwechsel vom klassischen physikalischen Weltbild zur modernen Physik zu erleichtern, ist es förderlich, dass Schülerinnen und Schüler den klassischen Determinismus und den Begriff der Kausalitätskette auch außerhalb des Physikunterrichts kennenlernen. Es kann eng mit dem Philosophieunterricht zusammengearbeitet werden. Des Weiteren kann im Mathematikunterricht der Begriff der „Wahrscheinlichkeit“ genauer definiert werden. Manche Schülerinnen und Schüler verstehen unter diesem Begriff die umgangssprachliche Entsprechung für „Ungenauigkeit“ und „Zufall“. Das vorliegende Unterrichtskonzept zeigt eine

Möglichkeit auf, die moderne Physik ohne Welle-Teilchen-Dualismus zu unterrichten.

4.14.2 Stundenplanung auf Basis des Unterrichtskonzeptes

Es werden Stundenplanungen ausgearbeitet, für welche das Unterrichtskonzept als Basis dient, weiters fließen Unterrichtsmethoden aus der Physikdidaktik ein. Der zeitliche Rahmen wird anhand des österreichischen Lehrplans abgeschätzt. Die moderne Physik ist für das zweite Semester in der 7. Klasse unter dem Punkt: „Quantenphysik: Besonderheiten der Quantenwelt, Doppelspaltexperiment, Heisenbergsche Unschärferelation, statistische Deutung.“ (Österreich, 2020) vorgesehen. In diesem Semester stehen außerdem die Themengebiete Atomphysik und Einblicke in die Theorienentwicklung am Programm. Die für das vorgestellte Unterrichtskonzept zur Verfügung gestellte Zeit ist bei ein bis zwei Wochenstunden Physikunterricht deutlich begrenzt. Auf Basis von eigens beobachtetem und durchgeführtem Physikunterricht werden als eine grobe Schätzung der verfügbaren Gesamtunterrichtszeit für dieses Unterrichtskonzept vier Schulstunden zu je 50 Minuten angenommen. Die Stundenplanungen erstrecken sich auf vier Schulstunden und die ausgewählten Unterrichtsmethoden fließen in die Planung mit ein.

Unterrichtsmethode

Bevor eine konkrete Stundenplanung erfolgen kann, muss auf einer Ebene tiefer eine Unterrichtsmethode ausgewählt werden. Es stellt sich die Frage, welche Lernschritte die Schülerinnen und Schüler durchlaufen sollen, um das Lernziel zu erreichen. Darauf aufbauend können Sozialform, Medien und Methodenwerkzeuge ausgewählt werden. Bei Unterrichtsmethoden handelt es sich um Verfahren und Formen, mit denen Lehrkräfte und SchülerInnen den Unterricht gestalten, inszenieren und darin agieren. (Wiesner, et al., 2011, p.88). In der Physikdidaktik wird zwischen der Sicht- und Tiefenstruktur unterschieden. Zuerst wird die Tiefenstruktur ausgewählt und anhand derer folgt die Auswahl der passenden Sichtstrukturen. Für die Tiefenstruktur gibt es vier verschiedene Möglichkeiten:

- Wissen vertiefen;
- Konzepte wechseln: Wissen umformen;
- Probleme lösen: Wissen transformieren;
- Wissen durch Eigenerfahrung entwickeln. (Wiesner, et al., 2011, p.88)

Diese vier verschiedenen Unterrichtsmethoden werden allgemein erläutert und in Hinsicht auf das vorliegende Unterrichtskonzept besprochen. Die Methode „Wissen durch Eigenerfahrung entwickeln“ zielt darauf ab, Schülerinnen und Schülern selbst entdecken und aus Eigenerfahrung Konzepte aufzubauen zu lassen. Dieses Konzept gestaltet sich in der Umsetzung im Physikunterricht als relativ herausfordernd. „Die wenigsten physikalischen Konzepte können durch (Wieder-) Entdeckung aus unmittelbaren Erfahrungen herausgebildet werden.“ (Wiesner, et al., 2011, p.91). Schülerinnen und Schüler empfinden ihre eigenen, aus dem Alltag inspirierten Erklärungen glaubwürdiger. Als Lehrkraft läuft man bei dieser Art des Unterrichts Gefahr, SchülerInnenvorstellungen eher zu verstärken anstatt abzubauen. Die Konzepte in der modernen Physik sind den Alltagserfahrungen ziemlich fremd und es ist sehr viel Fachwissen erforderlich. Aus diesen Gründen wird auf diese Unterrichtsmethode verzichtet.

Die Unterrichtsmethode „Probleme lösen: Wissen transferieren“ zielt darauf ab, Wissen, über welches Schülerinnen und Schüler bereits verfügen, auf etwas Neues anzuwenden und vorhandene Wissens Elemente neu zusammenzusetzen. Besonders effektiv ist diese Methode, wenn mehrere Lösungswege zur Erfüllung der Aufgabe existieren und diese von verschiedenen Gruppen gefunden werden können. Auf diese Weise lernen Schülerinnen und Schüler voneinander und den eigenen Lösungsvorschlägen. In der fachdidaktischen Literatur wird vorgeschlagen, diese Methode bei Aktivitäten heranzuziehen, wenn deren Bearbeitung einen längeren Zeitraum umfasst, z.B. bei Projekten oder Forschungsaufgaben. Es ist auch denkbar, aus der Reihe von Experimenten, die den Abschluss des Unterrichtskonzepts markieren, eine Projektarbeit zu machen, wenn man sich für dieses Thema mehr Zeit nehmen kann. Für die reguläre Oberstufe, in der man ungefähr mit vier Stunden für dieses Themengebiet rechnen kann, wird aus Zeitgründen auf diese Unterrichtsmethode verzichtet.

In diesem Unterrichtskonzept werden die Methoden: „Wissen vertiefen“ und „Konzepte wechseln: Wissen umformen“ herangezogen. Bei der Unterrichtsmethode „Wissen vertiefen“ geht es darum, bereits gelerntes Wissen zu erneuern, neue Aspekte zu entdecken und auszuarbeiten und diese mit anderen Konzepten zu vernetzen beziehungsweise von anderen Konzepten abzugrenzen. Zu Beginn gilt es, das Vorwissen der Schülerinnen und Schüler zu aktivieren. Die Fachdidaktik empfiehlt zu diesem Zweck ein Experiment, welches von

Schülerinnen und Schülern selbst durchgeführt werden kann. (Wiesner, et al., 2011, p.89). Ein Ziel des Unterrichtskonzepts ist es, den Informationszustand in der modernen Physik einzuführen. Dazu wird zuerst der Zustand in der klassischen Physik betrachtet und das mithilfe eines Experiments, welches Schülerinnen und Schüler selbst durchführen. Es ist dies eine einfache Betrachtung eines Gegenstandes, welcher von einer Rampe rollt. Mit Hilfe einer Anwendung, welche ohne größere Umstände von jeder Schülerin und jedem Schüler mit einem Handy heruntergeladen werden kann, können mehrere Bilder übereinandergelegt werden. Auf diese Weise kann der Zustand (Ort, Impuls) des Objektes abgelesen und besprochen werden. Anschließend wird dieses Anwendungsbeispiel für den klassischen Zustand gemeinsam besprochen und der Begriff „Zustand“ wird genau definiert. Darauf folgend soll das Konzept verallgemeinert und von anderen Konzepten abgegrenzt werden. Um das zu erreichen, wird von der Lehrkraft ein Demonstrationsexperiment vorgeführt, welches den freien Fall von verschiedenen Objekten im Vakuum beinhaltet. Darauf aufbauend können Zustandsgleichungen, Kausalitätsgleichungen und der Laplace'sche Dämon besprochen werden. In diesem Lernschritt soll den Schülerinnen und Schülern klar werden, dass im Rahmen der klassischen Physik der Ort und Impuls eines Objekts bei genauer Kenntnis der Anfangsbedingungen und der wirkenden Kräfte genau vorhersagbar ist. Die Abgrenzung zu anderen Konzepten geschieht in der Besprechung der Thermodynamik, in welcher der Zufall als statistische Größe zurück in die Physik findet. Im nächsten Schritt werden weitere Anwendungen des Konzepts in verschiedenen Kontexten thematisiert so wie eine Vernetzung mit anderen Konzepten angestrebt. „Um den Lerninhalt dauerhaft zu verankern, muss anschließend ausreichend Gelegenheit sein, damit zu arbeiten.“ (Wiesner, et al., 2011, p.89). Um die Schülerinnen und Schüler selbst arbeiten zu lassen, wird im SchülerIn-SchülerIn- und SchülerIn-Lehrkraft-Austausch ein Ideennetz erstellt. Auf diese Weise wird auch der Begriff des klassischen Zustands überblicksmäßig festgehalten.

Wissen vertiefen

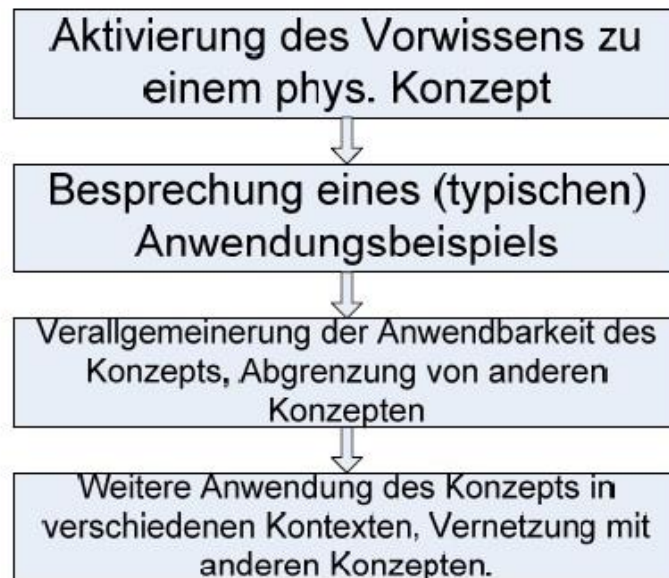


Abbildung 5: Unterrichtsmethode „Wissen vertiefen“ Quelle: (Wiesner, et al., 2017, p.88)

Um die nächsten Aspekte des Unterrichtskonzepts in den praktischen Unterricht zu bringen, bietet sich die Unterrichtsmethode „Konzept wechseln: Wissen umformen“ an. Diese Methode zielt auf einen Begriffswechsel ab. Daher geht es in diesem Unterrichtskonzept darum, von dem Zustandsbegriff aus der klassischen Physik zu dem Begriff „Informationszustand“ in der modernen Physik zu wechseln, was für diese Unterrichtsmethode sehr geeignet ist. In der Fachdidaktik werden zu dieser Unterrichtsmethode zwei Strategien unterschieden. In der einen werden SchülerInnenvorstellungen aktiviert. Das bedeutet, dass Schülerinnen und Schüler mit ihren Vorstellungen konfrontiert werden und anschließend wird ein kognitiver Konflikt ausgelöst, der zu einem Konzeptwechseln führen soll. In der anderen wird zuerst das neue Konzept vorgestellt und im Anschluss die Erklärungsmächtigkeit vorgeführt, untermauert und durch weitere Anwendungen in neuartigen Kontexten bei Schülerinnen und Schüler gefestigt. Das Vorwissen und eventuelle Vorstellungen von Schülerinnen und Schüler werden erst später aktiviert und direkt von der Lehrkraft angesprochen. Die Idee ist, dass von Schülerinnen und Schülern die Überlegenheit des neuen Konzepts erkannt und übernommen wird. Hier ergibt sich das Problem, dass es bei gewissen Themengebieten kaum möglich ist, bestimmte SchülerInnenvorstellungen nicht zu aktivieren. Wenn diese nicht frühzeitig im Unterricht thematisiert werden, wirken sie im Verborgenen weiter und das neue Konzept wird nicht angenommen.

Da es sich bei diesem Unterrichtskonzept um das Themengebiet der modernen Physik handelt, welches von sich aus der Alltagserfahrung widerspricht, wurde die erste Methode gewählt, in der die SchülerInnenvorstellungen direkt und zu Beginn angesprochen werden und einen kognitiven Konflikt bei den Schülerinnen und Schülern auslösen sollen. In der Physikdidaktik ist ein kognitiver Konflikt wünschenswert, weil dieser einen Konzeptwechsel erleichtern kann. Ein kognitiver Konflikt bei Schülerinnen und Schülern kann jedoch nicht einfach erzwungen werden. Ist für die SchülerInnen ihr eigenes physikalisches Konzept ausreichend, um physikalische Sachverhalte zu klären, so wird ein Konzeptwechsel erschwert. Hinzu kommt, dass es herausfordernd ist einen kognitiven Konflikt für alle Schülerinnen und Schüler gleichzeitig auszulösen. An dieser Stelle kommen die Experimente zur Beugung am Spalt zum Einsatz. Diese sind so aufgebaut, dass es zu Verwunderung auf Seiten der Schülerinnen und Schülern kommen soll, da es nicht möglich ist, den klassischen Zustand eines Lichtteilchens beliebig genau zu bestimmen. An dieser Stelle ist es besonders wichtig die Größen Δx und Δp genau einzuführen, da es eine Reihe von SchülerInnenvorstellungen zu diesem Thema gibt. Durch ein Ideennetz im Rahmen einer Klassendiskussion sollten alle Schülerinnen und Schüler das alte Konzept infrage stellen. Als nächsten werden neue Sichtweisen kennengelernt, indem die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation von der Lehrkraft vorgestellt wird und Kants Sichtweise über das Ding an sich und der Existenz der Attribute „Aufenthaltort“ und „Impuls“ thematisiert werden. Es folgt die Erprobung der Erklärungsmächtigkeit der neuen Sichtweise. Die Schülerinnen und Schüler werden dazu angehalten, die zu Beginn durchgeführten Experimente mit Hilfe der Heisenbergschen Unschärferelation in Hinblick auf den Zustand der Lichtteilchen zu beschreiben. Dies soll zuerst einzeln, dann paarweise und zu guter Letzt in Gruppen geschehen. Am Ende werden die Diskussionsergebnisse im Plenum besprochen. Um die neue Sichtweise mit alternativen Vorstellungen und Vorwissen zu vergleichen, wird ein Begriffsnetz gemeinsam mit Schülerinnen und Schülern erstellt. Auf diese Weise wird Ordnung zwischen der klassischen und der modernen Physik geschaffen. Den Abschluss des Unterrichtskonzepts bilden je nach Möglichkeit verschiedene Experimente, welche die Schülerinnen und Schüler mit Hilfe des neuen Informationszustandes bearbeiten. Auf diese Weise wird das neu Gelernte direkt angewandt und gefestigt. Es bieten sich Experimente mit Elektronen, Neutronen oder ähnliche

quantenmechanische Objekte an, zum Beispiel Beugung am Doppelspalt, Michelson-Interferometer oder das Neutroneninterferometer.

Konzepte wechseln: Wissen umformen

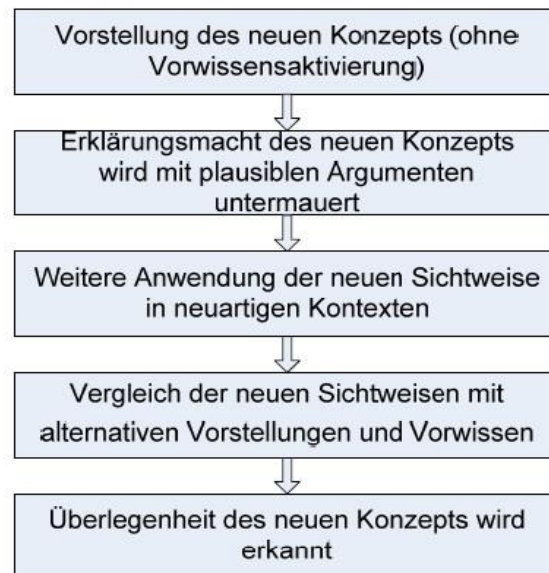


Abbildung 6: Unterrichtsmethode „Konzepte wechseln: Wissen umformen“ Quelle: (Wiesner, et al., 2017, p.89)

Nach der Vorstellung der Tiefenstruktur wird die Sichtstruktur beleuchtet. Die Sichtstruktur lässt sich daran erkennen, was man im Klassenzimmer direkt beobachten kann, wie zum Beispiel welche Sozialform gewählt wird, welche Medien oder welche Methoden-Werkzeuge eingesetzt werden. Die verwendeten Sozialformen und Medien für die Stundenplanungen werden in den Stundenplanungstabellen vermerkt. „Methoden-Werkzeuge sind lehrergesteuerte oder schüleraktive Verfahren, Materialien, Hilfsmittel zur Unterstützung von Lehr- und Lernprozessen“ (Wiesner, et al., 2011, p.93). „Der Einsatz von Methoden-Werkzeugen ist in erster Linie didaktisch und nicht methodisch zu begründen. So muss die Lehrkraft die Spezifika der Situation analysieren; ist es z.B. eine Situation des Übens, Ordners, Strukturierens, Problemfindens oder Präsentierens.“ (Wiesner, et al., 2011, p.93). Zuerst gilt es zu beachten, welche Unterrichtssituation bewältigt werden soll. Dazu gibt es sogenannte Standardsituationen, wie: Vorgänge und Experimente beschreiben, auf Ideen kommen, Neues erarbeiten, über Fachliches reden, Ordnung hineinbringen, Gelerntes üben und wirkungsvoll präsentieren. Jede dieser Standardsituationen hat ihre eigenen Methoden-Werkzeuge. Nicht in jeder Lernsituation müssen auch Methoden-Werkzeuge eingesetzt werden. „Methoden-Werkzeuge können dabei

helfen, methodische Stolpersteine zu umgehen, lösen aber keine fachdidaktischen Probleme." (Wiesner, et al., 2011, p.98). Des Weiteren sind Methoden-Werkzeuge oft sehr zeitintensiv und bei der Erstellung der Unterrichtsplanung muss sorgfältig abgewogen werden, ob der zeitliche Aufwand dem Nutzen gerecht wird. „Bekannt ist der Hawthorne-Effekt: Anfänglich wirkt (fast) jede neue Methode positiv. Daraus ist die Schlussfolgerung zu ziehen, dass der Methodenwechsel eine gute Methode ist." (Wiesner, et al., 2011, p.98) Bei der Auswahl der Methoden-Werkzeuge wird auf diese Umstände eingegangen. Die Standardsituationen für das Unterrichtskonzept werden analysiert und anhand der Fachliteratur „Physik kompakt“ werden geeignete Methoden-Werkzeuge ausgewählt. Standardsituation und Methoden-Werkzeug werden in den Stundenplanungstabellen vermerkt. Die Stundenplanungen werden ausgehend von fachdidaktischen Kriterien und Überlegungen erstellt. Besagte Überlegungen zur Stundenplanung sind theoretischer Natur und wurden im praktischen Schulunterricht noch nicht erprobt.

Stundenplanungen

Tabelle 1: 1. Und 2. Stundenplanung: Wissen vertiefen

Zeit min	Lernschritt: Inhalt	Standardsituation: Methodenwerkzeuge	Verwendete Medien: Sozialform
15	<u>Vorwissen aktivieren</u> : Hands-on Experiment Geschwindigkeitsmessung; App (Motion Shot) (Kugel rollt runter)	Experimente beschreiben: Filmleiste (durch APP von Schülerinnen erstellt)	-Körper rollt eine Rampe herunter: Gruppenarbeit -Drucker (Bilder werden ausgedruckt): Gruppenarbeit -Beamer (Lehrkraft projiziert ausgewählte Bilder) -Tafel (Lehrkraft sammelt Ergebnisse): Lehrer-Schüler- Austausch -Heft (SchülerInnen kleben ihre Bilder ins Heft)
20	<u>Besprechung eines Anwendungsbeispiels</u> : Besprechung des Experiments → Zustand, Ort und Impuls; man kann zu jedem Zeitpunkt dem Körper Ort und Impuls zuordnen	Über Fachliches reden: Wortliste, Begriffsinventar (Liste wichtiger Fachbegriffe) werden von der Lehrkraft zur Verfügung gestellt	-Tafel (Lehrkraft fasst die Beschreibung zusammen): lehrerzentriert -Wortliste (SchülerInnen haben Fachbegriffe für die Beschreibung des Experiments): Lehrer-SchülerIn- Austausch

			-Heft (SchülerInnen übertragen die Beschreibungen ins Heft): Einzelarbeit
25	<u>Verallgemeinerung der Anwendbarkeit des Konzept:</u> Lehrerexperiment: freier Fall im Vakuum, Bewegungsgleichung (Schüleradäquat), Kausalitätsprinzip, Diskussion: Vollständige und exakte Kenntnis der AWP, Diskussion: Laplace'scher Dämon, Zufall in der klassischen Physik, Kritik von Engels, Abgrenzung: statistische Physik → p,T,V	Über Fachliches reden: Thesentopf (Sammlung von Pro- und Contra-Thesen) Pro-These: Aufgrund der Bewegungsgleichungen kann man jedem Zeitpunkt einen Aufenthaltsort und einen Impuls zuordnen. Contra-These: Zufall ist auch in der klassischen Mechanik vertreten: Thermodynamik Diskussion mit SchülerInnen	-Vorzeigeeexperiment: freier Fall im Vakuum (von Lehrkraft vorgeführt) -Tafelbild: Bewegungsgleichungen (Ort-Zeit-Funktion, Geschwindigkeit-Zeit-Funktion, Beschleunigung-Zeit-Funktion) werden von Lehrkraft an die Tafel geschrieben: lehrerzentriert -Diskussion: Lehrer-SchülerInnen-Austausch -Tafel (Lehrkraft schreibt Pro- und Contra-Thesen auf): lehrerzentriert -Heft (Pro- und Contra-Thesen werden von SchülerInnen ins Heft übertragen): Einzelarbeit
15	<u>Weitere Anwendung in verschiedenen Kontexten:</u> Schülerinnen und Schüler sind aktiv und bilden das Ideennetz zum Begriff „Zustand“.	Auf Ideen kommen: Ideennetz (Sammlung von Ideen zum Thema Zustand)	-Diskussion: Lehrer-SchülerInnen-Austausch -Tafel (Lehrkraft schreibt Ideennetz auf): lehrerzentriert oder (Gruppen

			präsentieren (Ideennetz) Kleingruppen -Heft (Ideennetz wird ins Heft übertragen): Einzelarbeit
--	--	--	---

Tabelle 2: 3. und 4. Stundenplanung: Konzept wechseln: Wissen umformen

Zeit min	Lernschritt: Inhalt	Standardsituation: Methodenwerkzeuge	Verwendete Medien: Sozialform
20	<u>Kognitiver Konflikt</u> : Demonstrationsexperiment: Beugung am Spalt	Experimente beschreiben: Filmleiste	-Experiment (von Lehrkraft durchgeführt): lehrerzentriert -Heft (Filmleiste einkleben): Einzelarbeit
20	<u>Infragestellen alter Konzepte</u> : Besprechung des Experiments → Zustand, Ort und Impuls; <u>Kennenlernen neuer Sichtweise</u> : Folgerungen ziehen zwischen „dx klein“ und „dx groß“,	Auf Ideen kommen: Ideennetz wird von Lehrkraft erstellt Neues erarbeiten: von der Lehrkraft angeleitet	-Tafel (Ideennetz anschreiben, H.U.R.): lehrerzentriert -Heft (Ideennetz übertragen, H.U.R. aufschreiben): Einzelarbeit

	Vorstellung der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation und „Ding an sich“ (Existenz der Attribute) durch die Lehrkraft		
15	<u>Erklärungsmächtigkeit des neuen Konzepts erproben:</u> Erklärung des Demonstrationsexperiments durch H.U.R.; nur statistische Aussagen möglich	Neues Erarbeiten: Aushandeln (Think-Pair-Share)	-Heft (SchülerInnen kleben Arbeitsblatt ein): Einzelarbeit, Partnerarbeit, Gruppenarbeit
15	<u>Vergleich der verschiedenen Sichtweisen:</u> Folgerungen und Messprozess: Exakte Kenntnis zweier Attribute zu einem Zeitpunkt, Q.M. Zustand nicht mehr festgelegt, hat keinen Ort, Impuls	Ordnung hineinbringen: Begriffsnetz (physikalische Konzepte und Größen in ihren gegenseitigen Beziehungen grafisch darstellen)	-Tafel (Lehrkraft erarbeitet gemeinsam mit Schülerinnen und Schüler eine Gegenüberstellung des klassischen Zustandes und des Informationszustandes in der modernen Physik)
20	<u>Weitere Anwendung der neuen Sichtweise in neuartigen Kontexten:</u> Abschlussexperimente mit Elektronen, Neutronen: Grenze der QM, Beugung/Interferenz/Welcher-Weg-Detektor, Feststellung, dass das Attribut „Weg“ nicht mehr existiert. Sonst: Auflösungsvermögen	Über Fachliches reden: von Lehrkraft angeleitet	-Experiment (Lehrkraft führt Experiment durch oder gibt ein Gedankenexperiment wieder)

5 Diskussionskapitel

In diesem Kapitel werden Vorteile und Nachteile des erstellten Unterrichtskonzeptes besprochen. Sie stellen die Ergebnisse meiner Literaturforschung dar. Die Beantwortung meiner anfangs gestellten Forschungsfrage sind das erstellte Unterrichtskonzept inklusive der Stundenplanungen. Das erstellte Unterrichtskonzept entspricht dem österreichischen Lehrplan und kann an einer österreichischen Schule umgesetzt werden. Die dargestellten Ergebnisse sind theoretisch und stützen sich nicht auf praktische Erfahrungen. Meine formulierte These lautet: „Die aufgezeigte Leitlinie in diesem erstelltem Unterrichtskonzept entspricht dem österreichischen Lehrplan, ist im praktischen Unterricht möglich und von Vorteil für das physikalische Verständnis der Schülerinnen und Schüler der österreichischen Oberstufe.“ Auf Basis der erhobenen Fachliteratur kann beantwortet werden, inwiefern das erstellte Unterrichtskonzept für das physikalische Verständnis von Vorteil ist.

5.1 Vorteile und Nachteile des erstellten Unterrichtskonzeptes

Das erstellte Unterrichtskonzept ist ein theoretisches Konzept. Ein Nachteil des erstellten Unterrichtskonzeptes ist, dass es noch nicht im praktischen Schulunterricht getestet worden ist. Zu Beginn dringt das erstellte Unterrichtskonzept tief in die Weltsicht der klassischen Mechanik vor und rückt die deterministische Anschauung ins Zentrum der ersten Hälfte des Konzepts. Auf diese Weise werden SchülerInnenvorstellungen zum klassischen Determinismus, wie im Kapitel 3.3.2 beschrieben, direkt angesprochen und thematisiert. Das ist ein Vorteil gegenüber Unterrichtskonzepten, die den Determinismus der klassischen Physik und den Laplace'schen Dämon nur nebenbei erwähnen. Das Unterrichtskonzept zielt darauf ab, den Begriff „Informationszustand“ der modernen Physik einzuführen und es steht im Vordergrund des Unterrichtskonzepts, dass Schülerinnen und Schüler sich von dem klassischen Konzept des Determinismus verabschieden können. Um die Weltanschauung der modernen Physik besser zu verinnerlichen, legt das entworfene Unterrichtskonzept besonderen Wert auf die Existenz eines objektiven Zufalls in der Natur, der nicht vorhergesagt werden kann. Das ist ein Vorteil gegenüber anderen Konzepten, die mehr die historische Entwicklung der modernen Physik im Fokus haben.

Ein interessanter Punkt ist, dass das Unterrichtskonzept damit startet Licht als Teilchenstrahlung zu betrachten und Experimente zur Interferenz und Beugung am

Ende des Unterrichtskonzepts als quantenmechanische Phänomene besprochen werden. Das hat zur Folge, dass der Wellen-Aspekt, wie er in anderen Unterrichtskonzepten vorkommt, nicht thematisiert wird. Auf der eine Seite ist das von Vorteil da die Zeit, die in den Wellen-Aspekt und der dazugehörigen historischen Diskussion gesteckt wird, in die Entwicklung der Theorie der modernen Physik investiert werden kann. Laut dem österreichischen Lehrplan sollen auch „Einblicke in die Theorieentwicklung und das Weltbild der modernen Physik“ (Österreich 2020) gegeben werden. Das Weltbild der modernen Physik, seine Entwicklung und Schlussfolgerungen stehen im Zentrum des Unterrichtskonzeptes. Auf der anderen Seite kann ein möglicher Nachteil des Unterrichtskonzeptes darin liegen, dass es SchülerInnenvorstellungen zum Welle-Teilchen-Aspekt gibt. Der Wellenaspekt von Licht als elektromagnetische Welle wird laut Lehrplan (Österreich 2020) im ersten Semester der 7. Klasse besprochen. Es ist denkbar, dass bei manchen Schülerinnen und Schüler SchülerInnenvorstellungen zum Thema Welle und Teilchen aktiviert, jedoch im Unterricht nicht thematisiert werden. Die Physikdidaktik meint zu aktivierten SchülerInnenvorstellungen: „Wenn sie im Unterricht dann nicht frühzeitig thematisiert werden, wirken sie im Verborgenen weiter.“ (Wiesner, et al., 2011, p.90). Ob und inwiefern diese SchülerInnenvorstellung aktiviert wird, kann diese theoretische Arbeit nicht beantworten. Es ist auch möglich, dass aufgrund der Konzentration auf den Teilchen-Aspekt die Vorstellungen von Schülerinnen und Schülern, die sich Licht als Teilchen vorstellen und den Wellenaspekt unreflektiert mitnehmen, nicht aktiviert werden. Das wäre von Vorteil.

Eine weitere Schülerinnenvorstellung zum Thema Welle-Teilchen-Aspekt ist der „So-Mal-So-Dualismus“. Das Unterrichtskonzept ist so aufgebaut, dass es quantenmechanische Objekte als Objekte ansieht, die durch die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation beschrieben werden müssen. Der Welle-Teilchen-Dualismus wird nicht thematisiert mit dem Ziel, dass bei Schülerinnen und Schüler der „So-Mal-So-Dualismus“ nicht aktiviert wird. Letztlich bleibt es im Rahmen dieser theoretischen Arbeit nicht beantwortbar, wie Schülerinnen und Schüler reagieren. Andere Unterrichtskonzepte schlagen einen anderen Weg ein und thematisieren diese SchülerInnenvorstellung. Die Physikdidaktik sieht bei dieser Vorgangsweise einen möglichen Nachteil. „Das Problem dieser Vorgangsweise liegt darin, dass die Auseinandersetzung mit einer Schülervorstellung diese für den

Lerner möglicherweise noch verstärkt und der Konzeptwechsel unwahrscheinlicher wird.“ (Wiesner, et al., 2011, p.89).

5.2 Vorteile und Nachteile aktueller Unterrichtskonzepte

Vor- und Nachteile ausgewählter, aktueller Unterrichtskonzepte, wie sie gegenwärtig bestehen und teilweise in Schulen Anwendung finden, werden besprochen.

Schulbücher

Die Schulbücher von Sexl und Apolin sind sich im Aufbau relativ ähnlich. Beide beginnen mit der Aktivierung des Vorwissens zum Thema Interferenz und Beugung von Wellen. Bei beiden Büchern werden Wellen- und Teilcheneigenschaften von quantenmechanischen Objekten aus einem historischen Kontext heraus thematisiert und eingeführt. Auf diese Weise kann die Schülervorstellung des „Mal-So-Mal-So-Deterterminus“ aktiviert werden.

Im Allgemeinen läuft der historische Zugang Gefahr, den Welle-Teilchen-Dualismus bei Schülerinnen und Schüler dahingehend zu aktivieren, dass sie den Wellenaspekt unreflektiert mitnehmen und sich zum Beispiel vorstellen, dass Elektronen auf Wellen sitzen und auf- und abspringen, wie im Kapitel 3.3.2 beschrieben. Dieser Effekt kann durch den mathematischen Zusammenhang: $E = h \cdot f$ mit Energie (E), der Frequenz (f) und dem Planck'schen Wirkungsquantum (h), sowie der de Broglie-Materiewellen noch verstärkt werden. „Die mystische Folklore um den Welle-Teilchen-Dualismus vernebelt mehr, als dass sie aufklärt. Wenn gelegentlich behauptet wird, dass man Quantentheorie nicht verstehen kann, dann liegt das ja vielleicht auch daran, dass man an verstaubten Begriffen aus dem vorigen Jahrhundert festhält, die einem zeitgemäßen Verständnis der Theorie einfach nicht dienlich sind“. (Rupp, 2019, p. 186). Aus dieser Sichtweise kann man die Idee, die Quantenmechanik aus dem historischen Kontext heraus aufzubauen, als Nachteil betrachten. Auf der anderen Seite kann man argumentieren, dass der historische Kontext den Schülerinnen und Schüler den Weg aufzeigt, der zu der heutigen modernen Physik geführt hat und gibt ihnen auf diese Weise die Möglichkeit selbst zu entscheiden, was wertvoll ist und was nicht. Das kommt auf die genaue Umsetzung der Lehrkraft an und ist aus den Schulbüchern natürlich nicht ersichtlich. Das Buch von Sexl beinhaltet eine sehr ausführliche Darstellung der historischen Entwicklung der Quantenmechanik und gibt auch Einblicke in die Theorieentwicklung der Quantenmechanik. Es stellt sich

jedoch die Frage, wie viele Schülerinnen und Schüler von einer so detaillierten Ausführung erreicht werden.

Der Unterschied zwischen dem klassischen Zustandsbegriff und dem modernen Informationszustand wird thematisiert, aber steht nicht so sehr im Zentrum wie im vorgelegten Unterrichtskonzept, da der Zustandsbegriff der klassischen Physik als bekannt angesehen wird. Anstatt dass das vorhandene Vorwissen zu diesem Thema aktiviert wird, werden Beugungs- und Interferenzphänomen bei den Schülerinnen und Schüler in Erinnerung gerufen.

Münchener Unterrichtskonzept

Das Münchener Unterrichtskonzept beginnt mit dem historischen Problem des Photoeffekts und verwendet Beziehungen wie $E = h \cdot f$, mit der Energie (E), der Frequenz (f) und dem Planck'schen Wirkungsquantum (h). Dieses Unterrichtskonzept verwendet im Gegensatz zum vorgelegten Unterrichtskonzept veraltete mathematische Beziehung, die man als Relikte der historischen Entwicklung der Quantentheorie bezeichnen könnte. (Rupp, 2019, p. 186).

Das Münchener Unterrichtskonzept legt auf die Begriffe „Präparation“ und „Ensemble“ großen Wert und arbeitet über das ganze Konzept hinweg den Unterschied zwischen dem klassischen „Zustand“ eines Objekts und dem quantenmechanischen Informationszustand heraus. In diesem Aspekt ist es dem vorliegenden Unterrichtskonzept ähnlich.

Ein Vorteil dieses Unterrichtskonzepts gegenüber anderen Konzepten ist, dass es sehr viele experimentelle Phänomene dazu verwendet, um die Existenz von Aufenthaltsort, Impuls oder Weg eines quantenmechanischen Objekts in Frage zu stellen. Auf diese Weise bietet es Schülerinnen und Schülern vielfache Blickwinkel auf den quantenmechanischen Bereich der Physik.

Viele SchülerInnenvorstellungen finden im Münchener Unterrichtskonzept einen Platz und werden behandelt. Manchen Schülerinnen und Schüler fällt es schwer den Determinismus, wie er in der klassischen Physik existiert, loszulassen. Diese SchülerInnenvorstellung wird durch das Doppelspaltexperiment, in dem Schülerinnen und Schüler während sich das Interferenzmuster langsam aufbaut raten sollen, an welcher Stelle das nächste Photon eintrifft, angesprochen und thematisiert.

Ähnlich wie in den Schulbüchern wird die Quantentheorie so betrachtet, dass quantenmechanische Objekte einen Wellen- und einen Teilchenaspekt haben, die beide in die physikalische Theorie einfließen müssen. Anders als in den Schulbüchern werden Schülerinnen und Schüler durch mehrere physikalischen Phänomene so langsam und behutsam angeleitet, dass typische SchülerInnenvorstellungen wie der „Mal-So-Mal-So-Dualismus“ oder dass Schülerinnen und Schüler den Wellenaspekt unreflektiert mit dem Teilchenaspekt vermischen zwar aktiviert, aber auch gleich direkt besprochen werden. Durch den zweifachen Durchgang gleicher oder ähnlicher Experimente, zuerst mit Photonen und ein zweites Mal mit Elektronen oder ähnlichen quantenmechanischen Objekten, haben Schülerinnen und Schüler die zweifache Chance, diese SchülerInnenvorstellungen zu überwinden.

Ein möglicher Nachteil des Münchner Unterrichtskonzept gegenüber anderen Konzepten ist, dass es die Folgen des klassischen Determinismus, wie sie mit dem Laplace'schen Dämon dargestellt werden können, nicht explizit thematisiert und dieser Blickwinkel der Physik zu kurz kommt.

Ein weiterer Nachteil des Münchner Unterrichtskonzept ist, dass es sehr viele Unterrichtsstunden in Anspruch nimmt.

6 Zusammenfassung

Diese Forschungsarbeit untersucht, ob ein alternativer Weg zur Lehre der Quantenphysik, wie er in manchen Schulbüchern und Unterrichtskonzepten dargestellt wird, möglich und machbar ist. Schulbücher wählen meist den Weg der historischen Entwicklung der Quantentheorie. Dazu wird zunächst ein Teil des Entstehungsprozesses der Quantentheorie thematisiert. Es werden verschiedene Veröffentlichungen von Physikern dargestellt, die ihren Blickwinkel zur damaligen Situation der Quantenphysik widergegeben.

Um einen Einblick in vorhandene Unterrichtskonzepte zur quantenmechanischen Physik zu erhalten, werden österreichische Schulbücher und bestehende Unterrichtskonzepte analysiert und verglichen. Existierende SchülerInnenvorstellungen zur Quantenphysik werden dargestellt und als Basis für mögliche Unterrichtskonzepte benutzt.

Ein Unterrichtskonzept wird erstellt, welches fachdidaktischen Richtlinien und dem Skript „Romanos Physikkurs 2“ folgt, welches nicht den historischen Weg der

Quantenmechanik geht. Das erstellte Unterrichtskonzept wird mit denen aus den Schulbüchern und dem Münchner Unterrichtskonzept verglichen. Mögliche Vorteile und Nachteile besagter Unterrichtskonzepte werden thematisiert. Das Ergebnis dieser Arbeit ist, dass der Weg, welcher im Skript „Romanos Physikkurs 2“ eingeschlagen wird, im schulischen Unterricht gelehrt werden kann.

7 Abstract

This thesis analyses if an alternative teaching approach of quantum physics, compared to the current approach used in school textbooks and teaching concepts, is feasible. Textbooks usually start with the historical development of the quantum physics. Based on several publications of physicists, their view on quantum physics of their specific time in history are discussed.

First, existing teaching approaches of quantum mechanical physics are analyzed and compared in order to get an overview about the existing approaches. Additionally, existing students' ideas on quantum physics are described and taken as a basis for a possible new teaching approach.

Then, a new teaching approach, following rather the textbook 'Romanos Physikkurs 2' than the historical development of quantum physics, is prepared. The new approach is compared with current textbooks as well as the Munich teaching approach. Advantages and disadvantages of both approaches are discussed, resulting in the conclusion that the teaching approach of 'Romanos Physikkurs 2' could be used in school textbooks.

Literaturverzeichnis

Apolin, M., 2018. *Big Bang 7*. Wien: Österreichische Bundesverlag Schulbuch GmbH oebv.

Baumann, K. & et al., 1987. *Die Deutungen der Quantentheorie*. Wiesbaden: Vieweg.

Bell, J. S., 1966. *On the Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics*. Rev. Mod. Phys. 38.

Bohm, D., 1951. *Quantum Theory*. NY: Prentice Hall

Bohm, D., 1952. *A suggested interpretation of the quantum theory in terms of hidden variables I*. Phys. Rev. 85

Bohr, N., 1928. *Das Quantenpostulat und die neuere Entwicklung der Atomistik*. Naturwissenschaften 16.

Bohr, N., 1939. *Erkenntnistheoretische Fragen in der Physik und menschlichen Kulturen*. Nature 143. Abgedruckt in Bohr, N., 1985. *Atomphysik und menschliche Erkenntnis*. Braunschweig: Vieweg.

Bohr, N., 1979. *Diskussion mit Einstein über erkenntnistheoretische Probleme in der Atomphysik*. In Schilpp, P.A., 1979. *Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher, Reprint*. Braunschweig: Vieweg.

Born, M., 1926. *Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge (vorläufige Mitteilung)*. Zs. f. Phys. 37.

Born, M., 1926. *Quantenmechanik der Stoßvorgänge*. Zs. f. Phys. 38.

De Broglie, L., 1928. J. Phys. Radium 8.

Einstein, A., und Born, M., 1905. *Briefwechsel 1916 bis 1955*.

Einstein, A. & et. al., 1935. *Kann man die quantenmechanische Beschreibung der physikalischen Wirklichkeit als vollständig betrachten?* Phys. Rev. 47.

Einstein, A., 1948. *Dialectica*.

Einstein, A., 1979. *Aus meinen späteren Jahren*. Stuttgart: DVA

Fock, V., 1958. *Über die Deutung der Quantenmechanik*, in: *Max Planck Festschrift*. Berlin.

Heisenberg, W., 1925. *Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehung*. Zs. f. Physik. Abgedruckt in Ludwig, G., 1969. *Wellenmechanik, Einführung und Originaltexte*. Braunschweig: Vieweg.

Heisenberg, W., 1927. *Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik*. Zs. f. Physik 43.

Heisenberg, W., 1955. *Die physikalischen Prinzipien der Quantentheorie*. Mannheim: Bibliographisches Institut

Heisenberg, W., 1956. *Die Entwicklung der Deutung der Quantentheorie*. Phys. Bl. 12

Heisenberg, W., 1969. *Der Teil und das Ganze*. München: Piper.

Lenin, V.I., 1949. *Materialismus und Empirio-kritizismus*. Berlin.

Müller, R. & et al., Zugriff: 2020. *Das Münchner Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik*. [Online] Available at: https://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/archiv/inhalt_materialien/milq/muc_unterricht.pdf [Accessed 05.08.2020]

Neumann, J. v., 1932. *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*. Berlin: Springer

Omeljanowski, M. E., 1962. *Philosophische Probleme der Quantenmechanik*. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften.

Rupp, R. A., 2018. *Romanos Physikkurs*. Universität Wien: Universität Wien.

Schecker, H. & et al., 2018. *Schülervorstellungen und Physikunterricht*. Berlin: Springer Spektrum.

Schrödinger, E., 1926. *Quantisierung als Eigenwertproblem*. Ann. D. Phys. 79.

Schrödinger, E., 1935. *Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik*. Die Naturwissenschaften 29

Sexl, R. U. & et al., 2018. *Physik 7*. Wien: öbvht VerlagsgmbH.

Wikipedia, 2020. <https://de.wikipedia.org/wiki/Antinomie>. [Online] Available at: <https://de.wikipedia.org/wiki/Antinomie> [Accessed 05 August 2020]

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Die Körnigkeit des Bildes wird untermauert, indem die zeitliche Entwicklung einer unterbelichteten Fotografie gezeigt wird. Quelle: (Sexl, et al., 2018, p. 93)	40
Abbildung 2: Doppelspaltversuch mit klassischen Teilchen Quelle: (Sexl, et al., 2018, p. 95)	41
Abbildung 3: Doppelspaltversuch mit quantenmechanischen Objekten. Quelle: (Sexl, et al., 2018, p. 95)	41
Abbildung 4: Mach-Zehnder-Interferometer mit senkrecht eingestellten Polarisationsfiltern. Quelle: (Müller, et al., 2020, p.7)	55
Abbildung 5: Unterrichtsmethode „Wissen vertiefen“ Quelle: (Wiesner, et al., 2017, p.88)	83
Abbildung 6: Unterrichtsmethode „Konzepte wechseln: Wissen umformen“ Quelle: (Wiesner, et al., 2017, p.89)	85