

Bei dieser Arbeit handelt es sich um eine Wissenschaftliche Hausarbeit, die an der Universität Kassel angefertigt wurde. Die hier veröffentlichte Version kann von der als Prüfungsleistung eingereichten Version geringfügig abweichen. Weitere Wissenschaftliche Hausarbeiten finden Sie hier: <https://kobra.bibliothek.uni-kassel.de/handle/urn:nbn:de:hebis:34-2011040837235>

Diese Arbeit wurde mit organisatorischer Unterstützung des Zentrums für Lehrerbildung der Universität Kassel veröffentlicht. Informationen zum ZLB finden Sie unter folgendem Link:

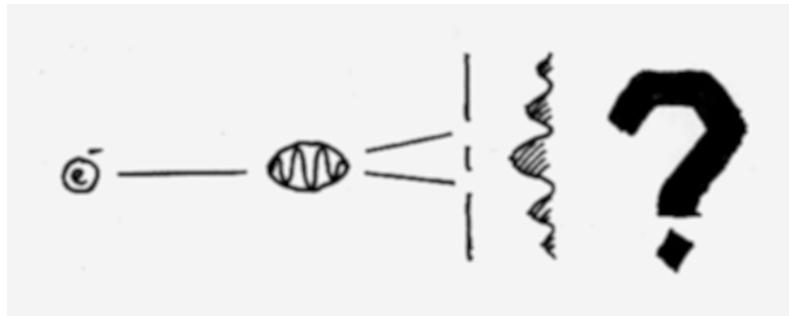
[www.uni-kassel.de/zlb](http://www.uni-kassel.de/zlb)

Wissenschaftliche Hausarbeit im Rahmen der ersten Staatsprüfung für das Lehramt an Gymnasien im Fach Philosophie, eingereicht dem Landesschulamt - Prüfungsstelle Kassel - zum 17.11.2014.

Verfasser: André Göller

Gutachter: Hr. Prof. Dr. Dr. Kristian Köchy

## Philosophische Aspekte des quantenmechanischen Messproblems



### Zusammenfassung

Das quantenmechanische Messproblem ist ein bekanntes Thema der Physik Anfang des 20. Jahrhunderts und bietet ein spannendes Feld interdisziplinärer Betrachtungen. Gerade die Philosophie, deren Arbeitsfeld methodisch oftmals auf einer Metaebene angesiedelt ist, liefert unterschiedliche Aspekte, um die Gesamtproblematik aus anderen Sichtweisen aus zu beleuchten.

Im ersten Teil werden die physikalischen Hintergründe sehr allgemein und verständlich geklärt, woraufhin sich im zweiten Teil die Auswahl philosophischer Aspekte anschließt. So wird die quantenmechanische Theoriebildung mit Thomas S. Kuhns Wissenschaftsentwicklung rekonstruiert, das Messproblem unter dem Konzept Falsifikationismus von Karl R. Popper widerspruchsfrei dargestellt und eine nicht dichotomische Naturvorstellung durch Michael Esfelds ontischen Strukturenrealismus ermöglicht.

(Schlagworte: Philosophie, Physik, Quantenmechanik)

# Inhaltsverzeichnis

Vorbemerkung	III
Einleitung	IV
<b>I Physikalische Grundlagen</b>	<b>1</b>
<b>1 Geschichte der Quantenmechanik</b>	<b>1</b>
1.1 Ausgangslage: klassische Physik . . . . .	1
1.2 Hinführung und Übergang . . . . .	3
1.3 Quantenmechanik als neue Theorie . . . . .	4
<b>2 Beschreibung einer Messung</b>	<b>8</b>
2.1 Doppelspaltexperimente . . . . .	8
2.2 'Das schönste Experiment aller Zeiten' . . . . .	12
2.3 Weiterführender Exkurs . . . . .	15
<b>3 Das quantenmechanische Messproblem</b>	<b>17</b>
<b>II Philosophische Aspekte</b>	<b>19</b>
Analyse der Theorie . . . . .	20
Analyse der Messung . . . . .	21
Analyse des Problems . . . . .	21
<b>4 Theorie</b>	<b>23</b>
4.1 Wissenschaftliche Revolution . . . . .	23
4.2 Theoriebildung der Quantenmechanik . . . . .	25
4.2.1 Quantenmechanische Revolution . . . . .	25
4.2.2 Kopenhagener Deutung . . . . .	28
4.2.3 Inkommensurabilität . . . . .	30
4.3 Inkommensurabilität und alternative Interpretationen . . . . .	32
<b>5 Messung</b>	<b>37</b>
5.1 Messung und Falsifikation . . . . .	37
5.2 Statistische Sichtweise der Messung . . . . .	39
5.2.1 Quantenmechanik und Falsifizierbarkeit . . . . .	39
5.2.2 Schrödingers Katze . . . . .	43
5.2.3 Blick auf das Messproblem . . . . .	44
5.3 Physik ohne Beobachtung . . . . .	45

<b>6 Problem</b>	<b>50</b>
6.1 Realismus der Naturwissenschaften . . . . .	50
6.2 Vorstellung und Wirklichkeit . . . . .	52
6.2.1 Moderater ontischer Strukturenrealismus . . . . .	52
6.2.2 Theorie des Elektrons . . . . .	55
6.2.3 Elektron im Strukturenrealismus . . . . .	57
6.3 Folgen für das Messproblem . . . . .	60
<b>III Fazit</b>	<b>63</b>
Zusammenfassung . . . . .	63
kritische Betrachtung . . . . .	65
Ausblick . . . . .	66
<b>Literatur</b>	<b>67</b>
<b>Eigenständigkeitserklärung</b>	<b>71</b>

## Vorbemerkung

Die vorliegende Arbeit trägt den Titel 'Philosophische Aspekte des quantenmechanischen Messproblems'. Sie ist als wissenschaftliche Hausarbeit in der Philosophie vom 28.08.2014 bis zum 17.11.2014 angefertigt und als Studienabschlussleistung für das erste Staatsexamen des gymnasialen Lehramts in Hessen eingereicht worden.

Zweck dieser Arbeit ist zunächst das Ziel des Studienabschlusses. Mit ihrer besonderen Thematik beinhaltet sie jedoch auch ein persönliches Interesse an der Schnittstelle von Philosophie und Physik. Der Fokus der Thematik liegt hierbei auf der philosophischen Seite, weshalb die physikalische Seite kurz gehalten ist und mathematische Ausführungen nicht vorkommen. Ferner ist zu betonen, dass die in dieser Examensarbeit behandelten Themen nicht so stark in die Tiefe gehen, wie es bei Professoren oder Doktoren der Wissenschaftsphilosophie zu erwarten ist. Vielmehr ist das Anliegen, eine Verortung der Philosophie innerhalb der Physik aufzuzeigen, wodurch das Vorgehen, der Umfang und die Zielsetzung der Ausführungen beeinflusst wurden.

Vor Beginn sei erwähnt, dass zur Zitation verkürzte Literaturangaben im Fließtext und der genaue Verweis im Literaturverzeichnis wiederzufinden ist. Die Fußnoten führen Querverweise ein und liefern fachliche Ergänzungen, um den Textfluss dadurch nicht zu unterbrechen. Um diesen ebenfalls einfacher zu gestalten, wurden gängige Begriffe (beispielsweise mit bspw. und ebenda mit ebd.) abgekürzt. Ferner sind innerhalb der Ausführungen Namen und wiederkehrende Elemente zur besseren Kennzeichnung hervorgehoben.

In der aktuellen Fassung wurde eine Überarbeitung von Rechtschreibung, Grammatik und Layout vorgenommen, der Inhalt jedoch gegenüber der Fassung von der Veröffentlichung im November 2014 nicht verändert. An dieser Stelle möchte ich noch einmal meinem Erstgutachter, Herr Prof. Dr. Dr. Kristian Köchy, danken, der als hervorragender Dozent seine Studierenden immer wieder erneut auf Gedankenreisen schicken kann.

André Göller, im Februar 2016

# Einleitung

Der Titel und Inhalt der wissenschaftlichen Hausarbeit sind die philosophischen Aspekte des quantenmechanischen Messproblems. Während das Thema klar festgesetzt wurde, ist die Aufgabenstellung zwar impliziert, aber auch relativ offen und weit gefächert. Somit ist es zu Beginn von besonderer Relevanz, das eigentliche Bearbeitungsfeld abzustecken. Das Verständnis des Themas wird zunächst eine wichtige Rolle einnehmen, um den genaueren Fokus der Arbeit festzulegen und eine geeignete Vorgehensweise zu wählen. Beginnen wird die Arbeit mit den 'Physikalischen Grundlagen' (Teil I), an deren Ausführungen sich die 'Philosophischen Aspekte' (Teil II) anschließen, die anschließend im 'Fazit' (Teil III) resümiert werden.

Der Hauptteil wird klar auf den philosophischen Aspekten in Teil II liegen, deren Struktur so verläuft, dass zunächst eine allgemeine Beschreibung der philosophischen Theorie mittels Primärliteratur vorgenommen wird. Im nächsten Schritt ist die Physik innerhalb eines ausgewählten Merkmals dieser Theorie ausgeführt, woraufhin ein Beispiel diesen Punkt verdeutlichen soll. Anhand weiterführender Literatur und/oder Sekundärliteratur steht danach ein erneuter Blick auf die Schnittstelle zwischen Philosophie und Physik an. Abschließen wird jedes der Kapitel mit einer thematischen Weiterführung, die in einer Überleitung zum nächsten philosophischen Aspekt mündet. Die einzelnen Aspekte und Kapitel sind somit als Fließtext zu verstehen, können jedoch auch einzeln betrachtet werden. Bevor es allerdings zur Klärung und Ausführung der philosophischen Aspekte kommt, wird die Ausgangslage zur Physik betrachtet.

Die Klärung der physikalischen Grundlagen beginnt mit der Theorie zur Quantenmechanik, in welcher das Problem der Messung lokalisiert ist. Einführend sei darauf hingewiesen, dass die Quantenmechanik klar von anderen physikalischen Quantentheorien abzugrenzen ist. Aus ihr entwickelten sich verschiedene Varianten - wie zum Beispiel die Quantenfeldtheorie und die Quantenelektrodynamik (um nur eine Auswahl zu nennen) - welche nicht thematisiert werden sollen. Während der Begriff der Quantenmechanik in der Literatur heute meist eine moderne physikalische Theorie zum Beginn des 20. Jahrhunderts bezeichnet<sup>1</sup>, durchlief er in seiner Entstehungsphase verschiedene inhaltliche Foki. So unterscheidet

---

<sup>1</sup>Bezug wurde hier auf Fachliteratur und Lehrbücher genommen, wie TIPLER/MOSCA (2006, S.1116) und NOLTING (2009, S.3).

FRIEDRICH HUND drei verschiedene Stadien der Quantentheorie:<sup>2</sup> Die „*Quantenstatistik (1900-1913) die Ausnutzung der Spektralgesetze (1913-1925) und die Gründung auf den Dualismus (1926-1927)*“ (Hund, 1984, S.21, Hervorhebung im Original). Um eine angemessene Beschreibung der Quantenmechanik zu erhalten, erscheint es angebracht, keine Definition der Theorie heranzuziehen, sondern die historische Entwicklung zu rekonstruieren.

Die Ausgangslage bildet die klassische Physik (Kap. 1.1), deren Grundzüge zu Teilchen- und Welleneigenschaften die Entwicklung der neuen Theorie beeinflussen (Kap. 1.2). Anhand der dort erwähnten Entwicklungen werden die fokussierten und wiederkehrenden Elemente dieser Arbeit anhand der wichtigsten Charakteristika herausgestellt (Kap. 1.3): die *Schrödingergleichung*, die *Unschärferelation* und der *Welle-Teilchen-Dualismus*. Um im Anschluss daran die Theorie zu verdeutlichen und anhand praktischer Messung auszuführen, wird zunächst eine allgemeine Einleitung zum physikalischen Thema um die sogenannten Doppelspaltexperimente stehen (Kap. 2.1). Die experimentellen Anwendungen von CLAUS JÖNSSON (Kap. 2.2) verweisen nämlich auf die zuvor erwähnten quantenmechanischen Charakteristika und im näheren Kontext (Kap. 2.3) auf das Problem der Messung (Kap. 3). Dieses besteht dann schließlich darin, dass ein Quantenobjekt nicht genau zu bestimmen ist.

Teil II, gleichzeitig der Hauptteil dieser Arbeit, bilden die philosophischen Aspekte, die mit den physikalischen Grundlagen in der Analyse der Ausgangslage verknüpft werden (vgl. S. 19). Um mit diesen Aspekten auf das quantenmechanische Messproblem einzugehen werden einzelne Begriffe des Themas (Theorie, Messung, Problem) analysiert und auf ihren Beitrag zum Messproblem hin untersucht. Thematisch sollen sich die anschließenden philosophischen Aspekte somit an der Theorieentwicklung der Quantenmechanik, der Messung als Überprüfung und dem Problem der Vorstellung orientieren.

Der erste philosophische Aspekt behandelt die Theorie der Quantenmechanik. Zur Einordnung in das wissenschaftstheoretische Konzept von THOMAS S. KUHN steht zu Beginn eine Beschreibung seiner Vorstellung einer wissenschaftlichen Revolution (Kap. 4.1), die von der Lösung bisheriger Probleme gekennzeichnet ist. Im Anschluss wird, mit KUHN, eine Spezifizierung vorgenommen, sodass die Revolution der Physik durch die

---

<sup>2</sup>Anmerkung: Es ist zu vermuten, dass HUND bewusst auf die Verwendung des Begriffs einer Theorie der Quanten achtet, um unter ihm die verschiedenen Theorien zusammenzufassen.

Quantenmechanik, im Hinblick auf die Problemlösung durch die *Schrödingergleichung*, stattgefunden hat (Kap. 4.2.1). Die Ausführungen zur Theorie sind auch mit der (damaligen) Interpretation durch die *Kopenhagener Deutung* verbunden (Kap. 4.2.2) und treffen einen weiteren Punkt der KUHNSchen wissenschaftlichen Revolution, die Inkommensurabilität (Kap. 4.2.3). Im Hinblick auf die klassische Physik, im Vergleich zur Quantenmechanik, zeigt sich eben jener Weltbildwandel, der durch den Begriff der Inkommensurabilität beschrieben wird. Doch nicht nur die unvereinbaren klassischen Bilder von Teilchen und Welle erzeugen Probleme in der Quantenmechanik, sondern auch ihre Interpretationen weisen untereinander unterschiedliche Weltbilder auf (Kap. 4.3).

Eine Möglichkeit der angemessenen Sichtweise auf das Problem der Messung wird im nachfolgenden Kapitel mit KARL R. POPPER vorgestellt. In diesem philosophischen Aspekt soll die Messung fokussiert werden, die, im allgemeinen wissenschafts- und erkenntnistheoretischen Kontext bei POPPER, die Rolle der falsifizierenden Theorieprüfung übernimmt (Kap. 5.1). Mit seinen Ausführungen zur Quantenmechanik und speziell zur *Unschärferelation* entwickelt er eine statistische Sichtweise (Kap. 5.2.1), die auf dem Betrachten von Wahrscheinlichkeiten beruht. Das Beispiel von *Schrödingers Katze* (Kap. 5.2.2) dient im Anschluss daran zur Verdeutlichung und Ausführung dieser Betrachtung mit dem Ergebnis, dass eigentlich kein Problem der Messung besteht (Kap. 5.2.3). Ohne die Problematik, die sich aus den physikalischen Grundlagen ergibt, ist es für POPPER auch möglich, dass eine Welt ohne Beobachter existiert, in welcher sich die Natur ebenso verhält (Kap. 5.3).

Im letzten Aspekt wird die Vorstellung von einer existenten Außenwelt im Sinne eines erkenntnistheoretischen Realismus aufgegriffen, an welchem das Problem der Naturvorstellung behandelt wird (Kap. 6.1). Mit der Verschiebung von einer klassischen Vorstellung hin zu einer strukturellen Variante des Realismus ist es möglich, das Vorstellungsproblem und den *Welle-Teilchen-Dualismus* zu umgehen (Kap. 6.2.1). Mittels historischer Ausführungen zur Begriffsentwicklung des Elektrons (Kap. 6.2.2) können die Unsicherheiten, ob es Teilchen oder Welle ist, dargestellt werden. Durch das Elektron im Weltbild des moderaten ontischen Strukturrealismus ist es möglich, durch eine Verlagerung von Eigenschaften des Objekts hin zu seinen strukturellen Relationen, ein Bild der Natur zu erstellen, welches unproblematisch behaftet ist (Kap. 6.2.3). Ferner widmen sich schließlich die letzten Ausführungen des onti-

schen Strukturenrealismus dem Thema des quantenmechanischen Messproblems allgemein (Kap. 6.3).

Der letzte Teil der Arbeit ist das Fazit, in welchem die Untersuchungsergebnisse zusammengefasst dargestellt werden. Ergänzend dazu folgen Hinweise auf kritische Momente der Untersuchung, die erwähnt und ausgeführt werden. Danach bildet der Ausblick der insgesamt behandelten Problematik den Blick auf das weiterführende Feld. Abschließend sei hier erwähnt, dass der Anspruch dieser Ausführung nicht die Lösung des quantenmechanischen Messproblems ist, sondern das Hinterfragen der Natur, der Theorie und der Erkenntnis. Ziel ist es, auf die philosophischen Aspekte der quantenmechanischen Theorie hinzuweisen und diese auszuführen, sodass die Philosophie als kritisches Element auf einer Metaebene in der Physik wiederzufinden ist - um zu hinterfragen, zu deuten und Auswege aufzuzeigen.

## Teil I

# Physikalische Grundlagen

## 1 Geschichte der Quantenmechanik

In der historischen Darstellung der Quantentheorie, die später zur Quantenmechanik wurde, lassen sich viele bedeutende Namen und Experimente nennen. Ein rein chronologischer Abriss über die Geschichte der Quantenmechanik wurde bereits vorgenommen<sup>3</sup>, weshalb lediglich eine Fokussierung auf spezielle Elemente stattfindet, die im späteren Verlauf wieder aufgegriffen werden. Mit der historischen Betrachtung der quantenmechanischen Theorie wird ein wissenschaftshistorischer Weg beschritten<sup>4</sup>, der frei von Interpretationen<sup>5</sup> ist.

### 1.1 Ausgangslage: klassische Physik

Vor der Theorie der Quantenmechanik, die den Übergang und Anfangspunkt zu modernen physikalischen Theorien bildet, zeichnete sich ein anderes Verständnis der Natur ab, als es die Physiker heute haben. Um später die Problematik besser zu verstehen, ist es wichtig, die Anschauungen der damaligen Zeit näher zu betrachten, sodass die Neuerungen innerhalb der Theoriewelt klar zum Vorschein kommen.

„Das Gesamtbild der theoretischen Physik gegen Ende des 19. Jahrhunderts ist [...] durch zwei Begriffssysteme gekennzeichnet, das der Mechanik und das des elektromagnetischen Feldes“ (Hund, 1984, S.14). In anderen Worten lassen sich diese beiden Bereiche mittels konträr gegenüberstehender Beschreibungen (links die Wellen bzw. Felder, rechts die Teilchen bzw. Materie) wie folgt charakterisieren (entnommen Pietschmann, 2003, S.2):

- Kontinuumsphysik - Physik des Diskreten
- Wellenphänomene - Teilchenphänomene
- Physik der Felder - Physik der Massepunkte

---

<sup>3</sup>Vgl. hierzu FRIEDRICH HUND (1984, 'Geschichte der Quantentheorie').

<sup>4</sup>Vgl. hierzu Kap. 4.1 auf Seite 23.

<sup>5</sup>Vgl. hierzu die Interpretation der *Kopenhagener Deutung* in Kap. 4.2.2 auf Seite 28.

Das Begriffssystem der klassischen Mechanik ist als „Physik der Massepunkte“ (ebd., S.1f.) beschrieben und beschäftigt sich mit Phänomenen, die den Teilchen und somit der Materie<sup>6</sup> zuzuordnen sind. Als Beispiel zur Illustration kann, im Falle von Teilcheneigenschaften, eine Gewehrkugel herhalten: Die geschossene Kugel lässt sich (idealisiert) als Massepunkt ansehen, die durch ihre Bewegung Träger einer ganz bestimmten (diskreten) Energie ist. Im Falle von Welleneigenschaften lässt sich das Bild von zwei auf der Wasseroberfläche schwimmenden Korken anführen: Wenn nun eine einzige Welle den ersten Korken erreicht, hebt sich dieser zunächst mit dem ankommenden Wellenberg und kehrt wieder in seine Ausgangsposition zurück. Danach wird der zweite Korken erfasst, der ebenfalls die gleiche Bewegung vollzieht. Die Welle transportiert die Energie, durch welche sich der erste Korken hebt, zum zweiten Korken, ohne dabei Masse von einem zum anderen zu bringen. Die Energie, gemessen an der Höhe des gehobenen Korkens, ist in diesem Fall eine kontinuierliche Änderung, da er sich erst hebt und anschließend senkt.<sup>7</sup>

Um zwischen den beiden Systemen zu unterscheiden, lässt sich „experimentell eindeutig feststellen, ob es sich bei einem vorliegenden Prozess um ein Kontinuumsphänomen handelt oder nicht: Indem wir nach der Existenz von Interferenz fragen“ (ebd., S.5). Die Interferenz<sup>8</sup> zeichnet sich dadurch aus, dass zwei Wellen, die in Kontakt geraten, das Phänomen der Wechselwirkung aufweisen, was sich bei der Betrachtung in einem speziellen Wellenmuster zeigt (vgl. Tipler/Mosca, 2006, S.502f.). Somit lässt sich zeigen, ob Teilchen- oder Wellenphänomene vorliegen. Zusammenfassend ist festzustellen, dass sich die Teilchenphysik mit der Materie beschäftigt um klare (diskrete) Aussagen über die Natur zu treffen. Die Aussagen der Wellenphysik sind ebenfalls klar, jedoch beschreiben sie eher kontinuierliche Prozesse<sup>9</sup> und „die physikalischen Vorgänge sind dabei in den beiden Bereichen grundverschieden und unvereinbar“ (Pietschmann, 2003, S.2).

---

<sup>6</sup>PIETSCHMANN weist darauf hin, dass die Begriffe Massepunkt und Teilchen äquivalent sind - letzterer jedoch jünger ist (vgl. Pietschmann, 2003, S.1).

<sup>7</sup>Die physikalische Darstellung ist salopp an einem alltäglichen Beispiel festgemacht. Um eine fachliche Vorstellung zu erlangen, sind mathematische Formeln genauer als die vorgenommene sprachliche Darstellung. Einen kurzen Überblick liefert PIETSCHMANN (2003, S.2-7).

<sup>8</sup>Vgl. hierzu auch die Ausführungen zur Interferenz auf Seite 10.

<sup>9</sup>Die hier vorgenommene Darstellung der klassischen Physik soll ihre einzelnen Bereiche über die Vorstellungen nur kontrastieren. Es geht nicht um eine fachliche Darstellung der Inhalte. So war die Materie in der Wellenphysik nicht ausgeschlossen, da man beispielsweise „für die elektromagnetischen Feldgrößen [aufgrund der stofflichen Denkweise] einen stofflichen Träger, den Äther [brauchte]“ (Hund, 1984, S.14).

## 1.2 Hinführung und Übergang

Der deutsche Physiker WERNER HEISENBERG, der selbst maßgeblich zur Entwicklung der Quantenmechanik beigetragen hat, setzt den Anfang der Quantentheorie<sup>10</sup> an das Ende des 19. Jahrhunderts (vgl. Heisenberg, 1979, S.3). In dieser Zeit wurde von einigen Physikern an der Wärmestrahlung<sup>11</sup> experimentiert - mit dem Ergebnis, dass MAX PLANCK sein „Gesetz der Wärmestrahlung entdeckt[e]“ (ebd., S.4). Die von ihm aufgestellte Formel enthält jedoch eine Konstante<sup>12</sup>, die Planck als „*Quantisierung der Wirkung*“ (Pietschmann, 2003, S.15, Hervorhebung im Original) interpretierte und nur als ganzzahlige Vielfache auftreten sollte (ebd.).<sup>13</sup> Mit seiner weiteren Arbeit auf diesem Gebiet, indem er das strahlende Atom in eine mathematische Theorie übersetzte, legte er somit den Grundstein für die neue Theorie und „veröffentlichte seine Quantenhypothese im Dezember 1900“ (Heisenberg, 1979, S.5). Durch die Quantenhypothese gelang es ALBERT EINSTEIN im Jahr 1905 die Quantisierungsbedingung von PLANCK auf den sogenannten photoelektrischen Effekt anzuwenden. Dieser beschreibt „die Aussendung von Elektronen aus Metallen unter dem Einfluss von Licht“ (ebd. S.6). EINSTEIN „interpretierte, daß das Licht aus sogenannten Lichtquanten, d.h. aus Quanten von Energie bestehe, die sich wie Korpuskeln durch den Raum bewegen“ (ebd.), auf Metall treffen und Elektronen herauslösen können. Mit dem Übertrag der Quantenbedingung auf Licht entstand so die Lichtquantenhypothese, welche dem Licht Teilchen-, aber auch Welleneigenschaften mit einer diskreten Energie zusprach.

Unterdessen fanden auch Fortschritte bei der Entwicklung der Atommodelle statt. Das 1903 von JOSEPH J. THOMSON vorgestellte Modell einer positiv geladenen Kugel mit aufgesetzten negativen Ladungen vereinte „diskrete Aspekte (die „punktförmigen“ Elektronen) mit kontinu-

---

<sup>10</sup>Um zu Beginn noch ganz allgemein davon zu sprechen, wird hier dieser Terminus in Anlehnung an HUND verwendet. Die Quantentheorie sei ein umfassender Begriff, der die anfängliche Quantenstatistik, die darauf folgende Ausnutzung der Spektralgesetze und schließlich die Gründung auf den Dualismus umfasse (vgl. Hund, 1984, S.21).

<sup>11</sup>Dies ist die Abgabe elektromagnetischer Strahlung von Materie unter dem Einfluss von thermischer Energie (vgl. Tipler/Mosca, 2006, S.632).

<sup>12</sup>Die heute immernoch gültige Naturkonstante des PLANCKschen Wirkungsquantums  $h$ . Grundlegend ist mit der Quantisierung die Anfangsidee verbunden, dass nur noch diskrete und keine kontinuierlichen Werte (für bspw. die Energie) vorliegen.

<sup>13</sup>Mit der Einführung des Begriffs 'Quant' sind verschiedene Änderungen verbunden. Grundsätzlich wird hiermit ein diskretes Paket (von bspw. Energie) beschrieben. Die Quantentheorie bekam ihren Namen nämlich durch die Einführung solcher diskreten energetischen Abstufungen.

ierlichen (der positive Atomkörper)“ (Pietschmann, 2003, S.21, Anführungszeichen im Original). Auf Grundlage der Experimente von ERNEST RUTHERFORD wurde das Model von THOMSON jedoch bald darauf abgelöst von der Vorstellung eines „Atomkern[s], der positiv elektrisch geladen ist und fast die ganze Masse des Atoms enthält, und aus Elektronen, die um den Atomkern kreisen, ähnlich wie die Planeten um die Sonne“ (Heisenberg, 1979, S.7f.). Die nächste Modifikation des Modells von Atomen wurde von NIELS BOHR 1913 vorgenommen:

„Seine Theorie beruhte auf der Verbindung der klassischen Mechanik für die Bewegung der Elektronen mit Quantenbedingungen, die zu diesen klassischen Bewegungsgesetzen hinzugefügt wurden, [...]“ (Heisenberg, 1979, S.9)

Mit der Kombination aus Spektren, dem Atommodell von RUTHERFORD und der Quantisierung (vgl. Hund, 1984, S.69), gelang BOHR die Überführung der klassischen Atomvorstellung zur Quantentheorie des Atoms (ebd., S.68), in welcher die Elektronen nun auf diskreten Bahnen (bzw. Schalen) um den Atomkern kreisen. Dies war nach HUND der Beginn des Abschnittes in der Quantentheorie, der die Spektralgesetze ausnutzte (vgl. ebd., S.21). Mit dem Aufkommen des BOHRschen Atommodells, bis hin zur Formulierung der wesentlichen Merkmale der Quantenmechanik Mitte der 1920er Jahre, ergaben sich viele Modifikationen der Atommodelle<sup>14</sup>, aber auch verschiedene Widersprüche und Probleme (vgl. Heisenberg, 1979, S.10f.), die schließlich im „Versagen der älteren Quantentheorie“ (Hund, 1984, S.127) mündeten und so eine neue Theorie in Form der Quantenmechanik entwickelt wurde.

### 1.3 Quantenmechanik als neue Theorie

Ein nennenswerter Aspekt bei der Weiterentwicklung der Atommodelle in diesen Jahren wurde von LOUIS DE BROGLIE geäußert. „Er erkannte als erster, daß Elektronen als Wellen beschreibbar sind, und Mitte der zwanziger Jahre versuchte er diese Entdeckung mit der Tatsache zu versöhnen, daß sich Elektronen auch als Teilchen interpretieren lassen“

---

<sup>14</sup>Dieser Zeitabschnitt ist gekennzeichnet von vielen mathematischen Beschreibungen und speziellen Experimenten, die das Atommodell noch weiter modifizierten, die jedoch an dieser Stelle nicht weiter thematisiert werden (für Details siehe Hund, 1984, S.68-146).

(Gribbin, 1996b, S.220). Der kurz zuvor aufkommende Gedanke an Materiewellen wurde von ihm dahingehend weiterentwickelt, dass er nun Materie, also Teilchen, Welleneigenschaften zusprach, was im sogenannten *Welle-Teilchen-Dualismus* mündete (vgl. Hund, 1984, S.150). Mit der Beschreibung einer dualistischen Natur, die nun einerseits eine Interpretation des Elektrons als Teilchen und andererseits als Welle zuließ, wurde nun Materie explizit in der Quantentheorie thematisiert. Durch die Analogie von Licht und Materie entwickelte sich aus der allgemeinen Quantentheorie die speziellere Quantenmechanik, da sich die Mechanik klassischer Weise auf Materie (Teilchen) bezog (vgl. ebd., S.148).

„Die erste Fassung einer streng gültigen Quantenmechanik, die folgerichtig und verallgemeinerungsfähig war, brachte HEISENBERGs Abhandlung vom Juli 1925“ (vgl. ebd, S.136, Kapitälchen im Original)<sup>15</sup>, deren Weiterentwicklung in den darauf folgenden Monaten eine komplexe aber auch schlüssige Abwandlung des klassischen mathematischen Formalismus war (vgl. ebd., S.144). Neben der Fassung von HEISENBERG gab es noch weitere mathematische Darstellungen, wobei sich schließlich die von ERWIN SCHRÖDINGER durchsetzte. Den Gedanken der Materiewelle weiterführend, entwickelte SCHRÖDINGER einen mathematischen Formalismus zur Wellenmechanik (vgl. Heisenberg, 1979, S.16), der später als sogenannte *Schrödingergleichung*<sup>16</sup> bezeichnet wurde. Ferner konnte er zeigen, dass sein Formalismus zu den anderen äquivalent war und zusätzlich noch die Komponente der Wahrscheinlichkeitswelle<sup>17</sup> beinhaltete. Mit dem Beginn der Quantentheorie als Quantenstatistik waren nämlich zusehends statistische Verteilungen (vor allem durch die Wärmestrahlung) in die Theorie eingeflossen und waren somit das Charakteristikum der Wahrscheinlichkeit in die Quantentheorie. Durch die Formulierung der *Schrödingergleichung* konnte somit ein Quantensystem in all seinen Facetten mathematisch beschrieben werden.

Neben den zuvor genannten wichtigen Entwicklungsschritten kam es zu einer weiteren besonderen Entdeckung. Bei seinen Überlegungen fragte sich HEISENBERG immer wieder, „ob die Natur wirklich so absurd sein

---

<sup>15</sup>Vgl. hierzu die Veröffentlichung von HEISENBERG (1925) im Literaturverzeichnis.

<sup>16</sup>An dieser Stelle sei auf die Bestandteile der Gleichung verwiesen, die eine Wellenfunktion in einer Energiegleichung beinhaltet. Wenn im Nachfolgenden von der *Schrödingergleichung* die Rede ist, fällt unter den Begriff auch die stochastische Wahrscheinlichkeit eines Quantenobjekts. Diese ergibt sich nämlich aus einer mathematischen Umformulierung der Wahrscheinlichkeitswelle.

<sup>17</sup>Diese wurde 1924 von NIELS BOHR, HENDRIK A. KRAMERS und JOHN C. SLATER formuliert (vgl. Heisenberg, 1979, S.16).

könnte, wie sie [...] [ihm] in diesen Atomexperimenten erschien“ (Heisenberg, 1979, S.19). Mit der Umformulierung dieser Frage gelangte er schließlich auf den Weg, an dessen Ende er 1927 seine *Unschärferelation* veröffentlichte:

„Man konnte zwar über den Ort und die Geschwindigkeit eines Elektrons sprechen wie in der Newtonschen Mechanik, man konnte die Größen auch beobachten und messen. Aber man konnte nicht beide Größen gleichzeitig mit einer beliebigen Genauigkeit bestimmen.“ (Heisenberg, 1979, S.20)

Diese Ausformulierung entstammt aus der mathematischen Formulierung zum Prinzip der Unbestimmtheit (auch *Unschärferelation* genannt), die ihrerseits eine reine mathematischer Struktur<sup>18</sup> ist und besagt, dass die exakte Bestimmung zweier gekoppelter Größen unmöglich ist (vgl. Bohr, 1979, S.120ff.). Experimentell bedeutet das die Ungenauigkeit in der Messung zugunsten einer anderen Größe (die an die gemessene Größe durch den Formalismus gekoppelt ist), was bspw. den Ausschluss der Ortsmessung bei gleichzeitiger Geschwindigkeitsmessung zur Folge hat.

Die vorgenommene Begriffsbestimmung der Quantenmechanik ist in der hier präsentierten Form eine nicht-relativistische<sup>19</sup> Darstellung (vgl. Hund, 1984, S.206), die jedoch als vollendet angesehen werden kann (vgl. ebd., S.16). Die Aufgabenstellung im Themenfeld der Quantenmechanik soll an dieser Stelle klar die relativistischen Aspekte ausschließen, weil die bisherigen Grundlagen zur Bearbeitung dieses Gebietes nicht ausreichen würden. Sie stellt nämlich, neben den eingangs erwähnten Formen, eine Weiterentwicklung<sup>20</sup> dar, die nach 1927 stattfand (vgl. ebd., S.206f.). Die bisherige fachliche Tiefe soll genügen, da die wichtigsten Elemente der Quantenmechanik abgedeckt werden.

Als wichtigste Entwicklungsstufen der Quantenmechanik lassen sich, zusammenfassend aus der vorherigen historischen Rekonstruktion, drei Elemente nennen. Mit der HEISENBERG'schen *Unschärferelation* wird ein

---

<sup>18</sup>Anmerkung: Mathematisch bedeutet dies, dass ein aus zwei Größen bestehendes Paar aus kanonisch konjugierten Variablen besteht, die in einer Ungleichung in Relation zu einander stehen (vgl. Hund, 1984, S.183).

<sup>19</sup>Anmerkung: Die Ausführungen und Formeln befassen sich so nur mit quantenmechanischen Objekten, die sich weit unter der Lichtgeschwindigkeit bewegen (vgl. Tipler/Mosca, 2006, S.318).

<sup>20</sup>Für einen Überblick über die Weiterentwicklungen der Quantenmechanik siehe HUND (1984, S.206-222).

besonderes Charakteristikum der Messung deutlich, die eine genaue Bestimmung zweier gekoppelter Größen unmöglich macht. Mit dem *Welle-Teilchen-Dualismus* weist die Quantenmechanik auf den Wellencharakter von Materie hin. Es ist von Bedeutung, Materie bzw. Teilchen nun nicht mehr nur im klassischen Sinne als Massepunkte zu verstehen, sondern ihnen auch Welleneigenschaften zuzuschreiben.

Die *Schrödingergleichung* beschreibt als grundlegende Gleichung das dynamische Verhalten eines quantenmechanischen Systems. Als empirisches Element lässt sich nur ihre Beschreibung der Wahrscheinlichkeit nachweisen (vgl. Tipler/Mosca, 2006, S.1144), was bedeutet, dass die Gleichung über den Aufenthaltsort eines Elektrons nur Wahrscheinlichkeitsaussagen treffen kann. Sie „beschreibt die zeitliche Entwicklung eines Quantensystems“ (Esfeld, 2012a, S.466, im Glossar) und ist als mathematischer Formalismus aus der Verbindung<sup>21</sup> zwischen der Bewegungsgleichung von Teilchen mit der Wellenfunktion entstanden (vgl. Hund, 1984, S.154). Dies bedeutet eine formale (und sehr abstrakte) Kopplung von Wellen- mit dem Teilcheneigenschaften, was zusätzlich das Element der Wahrscheinlichkeit beinhaltet (vgl. hierzu Kap. 1.3 auf Seite 5). So lässt sich das dynamische Verhalten eines Elektrons zwar beschreiben, dessen Ort aber nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit bestimmen. Die Gleichung SCHRÖDINGERS stellt ein (oder sogar das) Kernelement bei dem quantenmechanischen Messproblem dar und ist in der vorgenommenen Darstellung der Quantenmechanik von entscheidender Bedeutung.

---

<sup>21</sup>Vgl. hierzu auch HEISENBERG, der auf die Transformierung zwischen den beiden möglichen Beschreibungen zum Teilchen- und Wellenbild hinweist (vgl. Heisenberg, 1979, S.50).

## 2 Beschreibung einer Messung

Im nachfolgenden Kapitel soll ein Experiment das quantenmechanische Messproblem veranschaulichen und herausstellen. Die Hinführung dazu übernehmen zunächst ganz einfache Überlegungen und alltägliche Analogien, die mit fachlichen Verweisen untermauert werden. Die folgenden Versuche zur klassischen Physik dienen sozusagen als Verständnisgrundlage für die damaligen Physiker. Das im Anschluss hervorgehobene Experiment von CLAUDIUS JÖNSSON stellt die Merkwürdigkeiten der Quantenmechanik anhand des Phänomens der Elektroneninterferenz heraus. Ein hervorgehobenes Element wird die *Schrödingergleichung* sein, die sich an ausgewählten Stellen wiederfindet und als theoretische Verdeutlichung des praktischen Phänomens dient. Darüber hinaus sollen Bezüge zu der Geschichte der Quantenmechanik hergestellt (vgl. Kap. 1) und anschließende Gedankenexperimente angefügt werden, wodurch sich ein Gesamtbild abzeichnet, das die praktischen mit den theoretischen Inhalten verbindet.

### 2.1 Doppelspaltexperimente

Der Einstieg zur Quantenmechanik und dem aus der Messung folgenden Problem, kann zunächst an einem verständlichen Beispiel verdeutlicht werden. Mittels des sogenannten Doppelspaltexperiments lassen sich verschiedene Charakteristika für Teilchen und Wellen der klassischen Physik verdeutlichen. Die schematische Darstellung in Abb. 1 soll diese Überlegung skizzieren und zeigt die Draufsicht auf die Versuchsanordnung. Eine Kugel - also Materie, wie bspw. eine Murmel - wird auf einen einzelnen Spalt zugerollt, den sie passiert und sich weiter zum Schirm bewegt, auf welchem sie dann auftrifft (und detektiert wird). Die Darstellung der Verteilung ist als Häufigkeitsmessung der Bereiche zu verstehen, an welchen die Murmeln detektiert werden.<sup>22</sup>

Im nächsten Versuch, der nun statt Teilchen Wellen verwendet, wird die Murmel durch eine Wasserwelle<sup>23</sup> ersetzt (vgl. Abb. 2). Diese trifft als ebene Welle auf den Einzelspalt und breitet sich dahinter kreisartig aus. Die Verteilung, die sich auf dem Schirm abzeichnet, ist ein Intensi-

---

<sup>22</sup>Anmerkung: Eine typische grafische Darstellung der Physik mit der Intensitätsverteilung, die auf den Ort aufgetragen ist.

<sup>23</sup>Die lediglich schematische Darstellung der Wasserwelle ist fachwissenschaftlich vorgenommen. Die Linien beschreiben aus der Draufsicht die Höhepunkte der Wasserwellenberge.

tätsmuster<sup>24</sup>, welches in der Mitte - also bei einem geraden Durchlauf - am stärksten ist und zu seinen Rändern des Grafen hin schwächer wird. Die Darstellung der Wellennatur, wie sie in Abb. 2 vorgenommen wurde, geht auf den „holländischen Physiker Christian Huygens“ (Tipler/Mosca, 2006, S.1005) zurück, der das Verhalten von Wellen, die von einzelnen Punkten ausgehen, untersucht hat. So lässt sich infolge des HUYGENSSchen Prinzips seit 1678 das klassische Wellenverhalten beschreiben (vgl. ebd., S.1005f.).

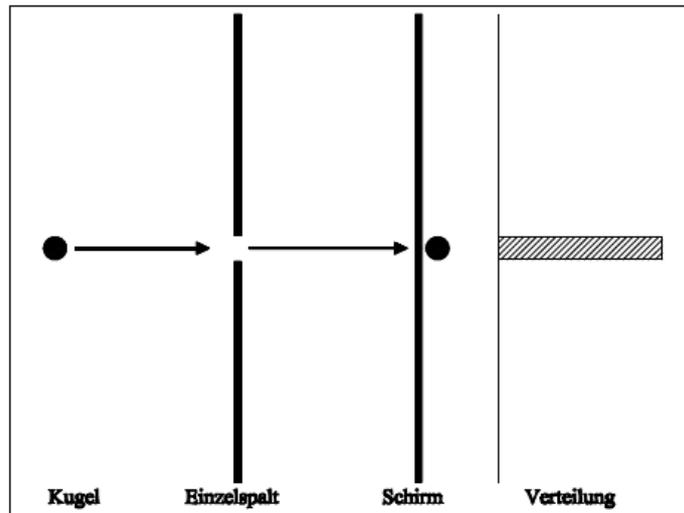


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer Kugel, die sich durch einen Spalt bewegt und eine diskrete Verteilung am Schirm erzeugt.

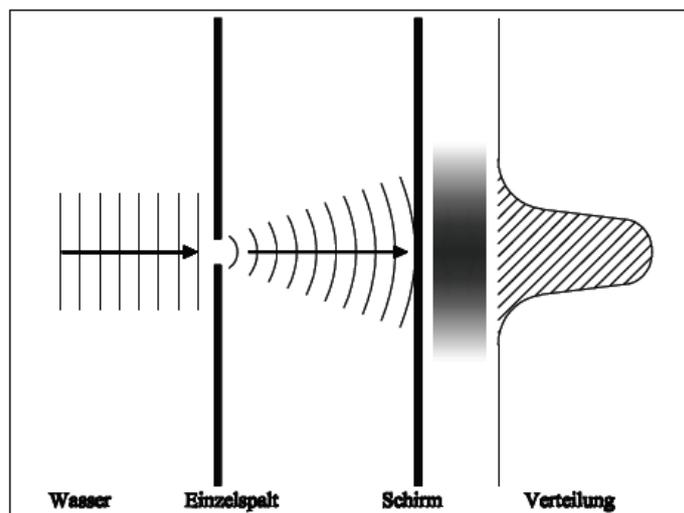


Abbildung 2: Schematische Darstellung einer Welle, die sich durch einen Spalt bewegt und eine Intensitätsverteilung am Schirm erzeugt.

<sup>24</sup>Eine physikalische Erklärung der Verteilung mit genauer graphischer Abbildung findet sich bei TIPLER/MOSCA (2006, S.1087f.).

Nun wird die Versuchsanordnung verändert und der Einzelspalt gegen einen Doppelspalt ausgetauscht. Die Murmeln, die auf den Doppelspalt zugerollt werden, passieren nun entweder die obere oder die untere Öffnung. Bei immer der gleichen Startposition und ausreichend vielen Murmeln, wird sich eine Verteilung einstellen, wie sie in Abb. 3 schematisch skizziert ist. Bei der Auswertung lässt sich erkennen, dass die Verteilung auf dem Schirm ein schlichtes Aufsummieren zweier Einzelspalte darstellt. Das bedeutet, dass die gleiche Verteilung vorhanden ist, wenn bei diesem Versuch für die Hälfte der Zeit der obere und für die andere Hälfte der untere Spalt offen ist.

Die gleiche Versuchsanordnung wird nun dazu verwendet, eine ebene Wasserwelle durch einen Doppelspalt zu schicken (vgl. Abb. 4). Als Verteilung auf dem Schirm präsentiert sich nun nicht eine Summe wie bei den Kugeln, sondern ein spezielles Linienmuster, das Phänomen der sogenannten Interferenz. Die Linie der höchsten Intensität liegt genau in der Mitte der Spalte, während sich noch weitere Linien geringerer Intensität oberhalb und unterhalb zeigen.

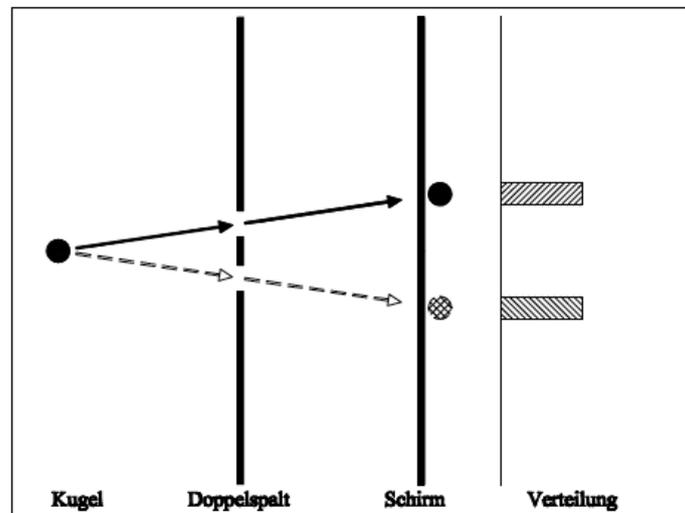


Abbildung 3: Schematische Darstellung einer Kugel, die sich durch einen der zwei Spalte bewegt und eine aufgespaltene Verteilung am Schirm erzeugt.

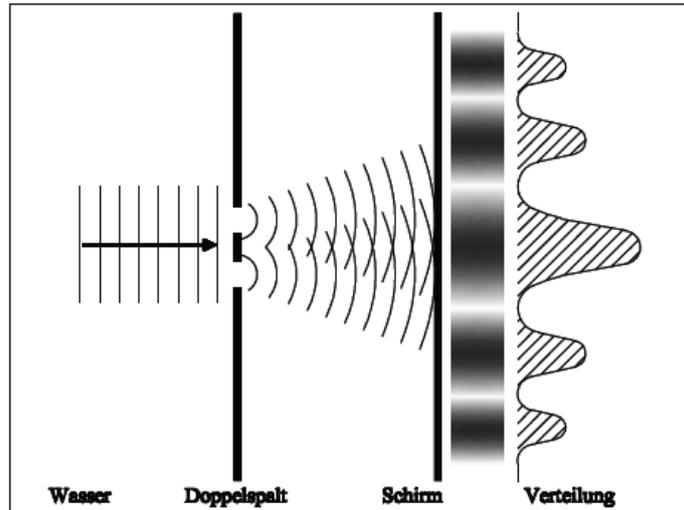


Abbildung 4: Schematische Darstellung einer Welle, die sich durch zwei Spalte bewegt und eine Interferenz-Verteilung am Schirm erzeugt.

Die ebene Anfangswelle erzeugt beim Durchlaufen des Doppelspaltes zwei neue Einzelwellen, die sich an verschiedenen Punkten überlagern (in der Abbildung ist dies durch die Schnittpunkte der Linien zu erkennen). Diese Überlagerung von zwei Einzelwellen wird Superposition genannt und lässt sich wieder mit dem Korken im Wasser erklären: Wenn sich der Korken durch eine Welle auf deren Maximum hebt und noch eine zweite hinzukommt, wird der Korken um die Höhe der zweiten Welle zusätzlich angehoben. Wenn die Überlagerungen nun auf den Schirm auftreffen, zeichnet sich auf ihm das Interferenzmuster ab. Mit dem Hinweis auf die klassische Physik ist das Interferenzphänomen ein Indikator für eine Welle.<sup>25</sup> Während sich Teilchen, sowohl bei dem Einzel- als auch bei dem Doppelspalt, geometrisch Verhalten, sind die Phänomene einer Welle anders. Bei dem Einzelspalt trifft sie auf einen Bereich des Schirms und zeigt dies in einem Intensitätsmuster. Bei dem Doppelspalt jedoch tritt kein aufsummiertes Intensitätsmuster auf (wie bei dem Doppelspalt mit den Murmeln), sondern das Phänomen der Interferenz, welches sich anhand mehrerer Streifen auf dem Schirm zeigt.

<sup>25</sup>Vgl. hierzu die vorherigen theoretischen Ausführungen auf Seite 2.

## 2.2 'Das schönste Experiment aller Zeiten'

Das BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG hat in Kooperation mit der DEUTSCHEN PHYSIKALISCHEN GESELLSCHAFT das in diesem Kapitel thematisierte Experiment von CLAUS JÖNSSON und die Quantenmechanik<sup>26</sup> zum Thema ihrer alljährlichen Veranstaltung 'Highlights der Physik' gemacht (vgl. Richter, 2008). Es wurde kurz zuvor unter englischen Physikern in einer Umfrage von 'Physics World' zum schönsten Experiment aller Zeiten gewählt (vgl. Crease, 2002, S.19f.). In ihm wird der Bruch zwischen klassischer und quantenmechanischer Physik deutlich, welcher das Verhalten von Elektronen an einem Doppelspalt darstellt.

Während die Ausführungen in Kap. 2.1 einfacher Natur sind und Experimente der klassischen Physik darstellen, findet mit dem Übertrag auf den kleineren Maßstab - das Elektron - ein gewisser Bruch statt. So wurde nun auch (zunächst als reines Gedankenexperiment) Materie, also Teilchen, auf diesen kleinen Maßstab gebracht und das zuvor beschriebene Experiment zum Doppelspalt durchdacht. Dieses Gedankenexperiment kam im Zuge der Quantenmechanik im Jahre 1927 auf, als BOHR und EINSTEIN an der Diskussion über Elektronen und Photonen (Lichtquanten) auf der fünften Solvay-Konferenz teilnahmen (vgl. Bohr, 1979, S.124). Mit dem Elektron, welches zum Beginn des 20. Jahrhunderts noch als Teilchen gedacht und genau so mit ihm experimentell gearbeitet wurde<sup>27</sup>, beschreibt BOHR in seinen Ausführungen ein mögliches Doppelspaltexperiment und spekuliert über dessen Ergebnis (vgl. ebd., S.124-130). Die Umsetzung des Gedankenexperiments gelang dem deutschen Physiker JÖNSSON 33 Jahre später, welches er in seiner Veröffentlichung mit dem Titel 'Elektroneninterferenzen an mehreren künstlich hergestellten Feinspalten' darlegt.<sup>28</sup>

An die Überlegungen BOHRs anknüpfend war die Durchführung von JÖNSSON erst nach einiger Zeit der Entwicklung möglich, da „es einige technische Schwierigkeiten [gab], die seine Verwirklichung bisher verhindert haben“ (Jönsson, 1961, S.455). Ziel des Experiments war der Nachweis „der Beugung von Elektronenwellen“ (ebd., S.454) mit dem Ergebnis, „daß die von der Lichtoptik der bekannten Beugungserscheinungen

---

<sup>26</sup>Insgesamt eher die Quantentheorie, weil sie in ihren Ausführungen über die Mechanik hinaus reicht.

<sup>27</sup>Für einen detaillierteren Blick auf die Entwicklung des Begriffs und der Vorstellung zum Elektron vgl. Kap. 6.2.2 auf Seite 55.

<sup>28</sup>Vgl. hierzu die Arbeit von JÖNSSON (1961).

an mehreren Spalten in entsprechender Weise auch mit Elektronenwellen beobachtet werden können“ (ebd., S.474). Sein Versuchsablauf war wie folgt:

„Er „beleuchtete“ einen Doppelspalt statt mit Licht mit einem Elektronenstrahl und registrierte die ankommenden Elektronen hinter den beiden Spalten auf einer Fotoplatte. Obwohl sie beim Aufschlag auf der Platte eindeutig ihre Teilcheneigenschaften zeigten - jedes Elektron erzeugte einen schwarzen Punkt - bildete sich im Lauf der Zeit, nachdem viele Elektronen eingeschlagen waren, genau wie beim Licht ein Interferenz-Streifenmuster auf der Fotoplatte.“ (Richter, 2008, S.7, Anführungszeichen im Original)

Das beobachtete Ergebnis zum Doppelspalt zeigt sich an den registrierten Streifen des Interferenzmusters in Abb. 6. Der experimentelle Nachweis, dass sich Elektronen auch wie Wellen verhalten, war gelungen und er belegte das Ergebnis, welches BOHR vorhergesagt hatte: die Interferenz von Elektronen (vgl. Bohr, 1979, S.128ff.). Anhand der Originalaufnahmen<sup>29</sup> lassen sich sowohl am Einzelspalt in Abb. 5 als auch am Doppelspalt in Abb. 6 die Welleneigenschaften der Elektronen ausmachen:

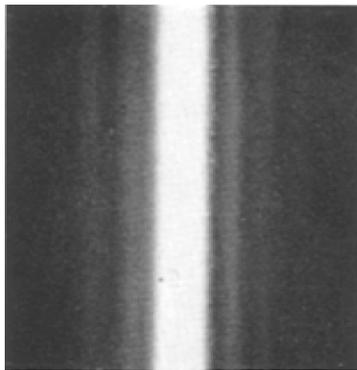


Abbildung 5: Original der „Elektronenbeugungsaufnahme an einem Spalt“ (Jönsson, 1961, S.468).

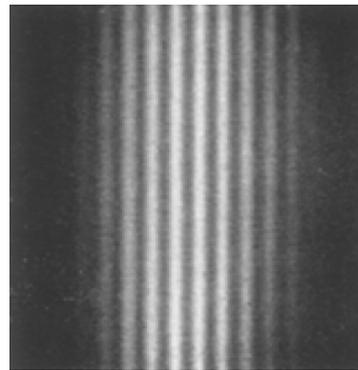


Abbildung 6: Original der „Elektronenbeugungsaufnahme an zwei Spalten“ (Jönsson, 1961, S.468).

<sup>29</sup>Abb. 5 und 6 wurden als Original entnommen: Jönsson, Claus (1961): 'Elektroneninterferenzen an mehreren künstlich hergestellten Feinspalten'. In 'Zeitschrift der Physik', 161, S.454-474, dort als Fig. 7 und Fig. 8 auf S.468 bezeichnet. Mit freundlicher Genehmigung der 'Springer Science+Business Media' für die Verwendung in dieser Arbeit.

Das Verhalten der Elektronen im Doppelspaltversuch zeigte sich noch deutlicher als der japanische Physiker TONOMURA AKIRA den Versuch mit einer geringeren „Elektronenschussrate“ durchführte. Das Ergebnis war, dass sich langsam das Interferenzmuster aufbaute und die einzelnen Elektronentreffer auf der Fotoplatte ausgemacht werden konnten, die mit der Zeit schließlich ein Interferenzmuster bildeten (vgl. Richter, 2008, S.9).

Das Detektieren der Elektronen funktionierte (sowohl bei AKIRA als auch bei JÖNSSON) mittels einer Fotoplatte, die auf sie aufschlugen und die betreffende Stelle einfärbten.<sup>30</sup> Mit zunehmender Zeit waren immer mehr einzelne Punkte auf der Platte zu erkennen und zeigen die Teilcheneigenschaft der Elektronen, bis nach vielen Einschlägen das bekannte Interferenzmuster zu erkennen war. „Ein Elektron erzeugt einen Punkt, viele Elektronen erzeugen ein Streifenmuster“ (ebd.) - also Interferenz und somit Welleneigenschaften. Die folgende Erklärung des Versuchs macht den Vorgang nochmals deutlich:

„Sobald ein Atom [oder ein Elektron] die Quelle verlassen hat und Kurs auf die beiden Spalte nimmt, breitet sich auch die Wellenfunktion in diese Richtung aus. Ist sie bei den beiden Spalten angekommen, beträgt die Aufenthaltswahrscheinlichkeit für das Atom [oder Elektron] in jedem der beiden Spalte 50 Prozent. [...] Die Teilwellen aus den Spalten überlagern sich und bilden auf der Fotoplatte ein Interferenz-Muster. Jede Stelle in diesem Muster entspricht nun einer Wahrscheinlichkeit, die das Atom [oder Elektron] gerade an diesem Ort zu finden [...]. Das Atom [oder Elektron] wird sich nun zufällig für eine der möglichen Stellen entscheiden und dort als Teilchen „materialisieren“. [...] Mit dem Eintreffen von weiteren Atomen [oder Elektronen] (jedes mit einer neuen, aber gleich aussehenden Wellenfunktion) entsteht nun allmählich auf der Fotoplatte das reale Streifenmuster.“ (Richter, 2008, S.16, Anführungszeichen im Original)

---

<sup>30</sup>Anmerkung: Es sei darauf hingewiesen, dass der Prozess der chemischen Färbung eine Schwärzung der betreffenden Stelle beschreibt. In den Abb. 5 und 6 sind die betroffenen Stellen jedoch helle Stellen, da diese Negativaufnahmen sind.

## 2.3 Weiterführender Exkurs

Die Doppelspaltversuche mit Materie, vor allem das Experiment von JÖNSSON, sind in Folge der Quantenmechanik (vgl. hierzu Kap. 1.3 auf Seite 4) zu deuten. Zunächst zeigt sich offensichtlich die dualistische Natur der Elektronen, die sich bei der Detektion als Teilchen, bei der Verteilung aber als Wellen darstellen. Ihr Verhalten lässt sich mit der *Schrödingergleichung* ausdrücken, die für Materie eine Beschreibung des Verhaltens als Welle liefert. Die Verteilung ergibt sich aus der *Stochastik*, welche dem Charakter der Wahrscheinlichkeit in der *Schrödingergleichung* innewohnt und für jedes Elektron gilt. Die Interferenzfähigkeit von Quantenobjekten, durch die Gleichung SCHRÖDINGERS, und die eindeutige Messung eines Elektrons am Schirm (punktuelle Schwarzfärbung) bilden zwei weitere Wesenszüge der Quantenphysik, wie sie von fachlicher Seite aus beschrieben werden (vgl. Küblbeck/Müller, 2003, S.51).

Das quantenmechanische Messproblem lässt sich mit dem ‘Welcher-Weg-Experiment‘ (vgl. Busch/Jaeger, 2009, S.846), als weiteres Gedankenexperiment, noch mehr zuspitzen. Es war Bestandteil der Konferenz um die Debatte von BOHR und EINSTEIN über die Interpretation der Quantenmechanik<sup>31</sup>, in welcher BOHR den Doppelspaltversuch so modifiziert, dass lediglich ein einzelnes individuelles Objekt (bei BOHR war es ein Photon) verwendet wird und nachgewiesen werden soll, durch welchen Spalt es geht (vgl. Bohr, 1979, S.130-136). „Wir müßten einerseits sagen, daß das Photon immer *einen* der beiden Wege [durch die Spalte] wählt, andererseits aber, daß es sich verhält, als ob es *beide* Wege durchlaufen hätte“ (ebd., S.134, Hervorhebung im Original). Das einzelne Photon (ebenfalls ein Objekt mit Wellen- und Teilcheneigenschaften<sup>32</sup>) bewegt sich in diesem Fall auf den Doppelspalt zu, an welchem nachgewiesen wird, welchen der beiden Spalte es durchlaufen hat. Da der Nachweis nur an einem Spalt stattfinden könne, werde sich die Verteilung auf dem Schirm wie bei dem Einzelspalt darstellen (vgl. hierzu Abb. 2 auf Seite 9), weil der Nachweis des Ortes - der Theorie nach - das Interferenzmuster zerstöre.

---

<sup>31</sup>Aus der fünften Solvay-Konferenz ging die sogenannte *Kopenhagener Deutung* hervor (vgl. hierzu Kap. 4.2.2 auf Seite 28).

<sup>32</sup>Wie bereits in Kap. 1.2 auf Seite 3 zur Lichtquantenhypothese beschrieben. Erwähnenswert ist, dass der *Welle-Teilchen-Dualismus* bereits bei der Diskussion um das Licht mit der Hypothese EINSTEINS von 1905 eingeführt, jedoch erst 1922 allgemein akzeptiert wurde, da sie den sogenannten COMPTON-Effekt erklären konnte (vgl. Hund, 1984, S.39f.).

Eine empirische Durchführung dieses Gedankenexperiments ist bisher nur bedingt gelungen. Im Fall des Elektrons bleibt die Information, welchen Weg es eingeschlagen hat, nach wie vor im Dunkeln. Es gibt jedoch verschiedene Möglichkeiten der Umsetzung, die in ihrer Detailreife jedoch nicht dargestellt werden sollen. Lediglich als Hinweis und Ausblick auf eine Realisierung erscheint ein Überblick über die experimentelle Situation sinnvoll.<sup>33</sup> Es soll genügen anhand des Experiments von JÖNSSON den *Welle-Teilchen-Dualismus* der Elektronen und die experimentelle Anwendung der *Schrödingergleichung* zu sehen. Ferner lässt sich durch die Zuspitzung mittels dieses Gedankenexperiments das Messproblem noch weiter kontrastieren, indem durch die Anwendung einer Ortsmessung (welchen Spalt das Elektron genommen hat), das Interferenzmuster, beschrieben durch die *Unschärferelation*, verschwindet.<sup>34</sup>

In späteren Versuchen wurde die dualistische Natur von Welle und Teilchen auch bei größeren Objekten untersucht. Das Ergebnis war, „dass selbst bei so komplexen Molekülen wie den Fullerenen<sup>35</sup> die Messungen in voller Übereinstimmung mit der quantenmechanischen Erwartung sind“ (Arndt/Nairz, 1999, S.7, Fußnote eingefügt). Die Abschätzungen zeigen an, dass „erst bei etwa  $10^7$  Protonenmassen, also der Masse kleiner Viren,“ (vgl. ebd.)<sup>36</sup> eine Barriere des Dualismus anzutreffen ist und die Wellen- von der Teilchennatur verdrängt wird. Dieser Verweis auf die Quantenmechanik in größerem Maßstab macht die Bedeutsamkeit der Theorie deutlich, die sich nicht nur bei den kleinen Elektronen, sondern auch bei schon fast beobachtbaren Objekten zeigt.

---

<sup>33</sup>Vgl. hierzu die Ausführungen von BUSCH/JAEGER (2009).

<sup>34</sup>Vgl. hierzu das Problem der Unschärferelation mit der Elektronenbahn bei KARL R. POPPER auf Seite 40.

<sup>35</sup>Fullerene sind große kugelförmige Molekülstrukturen, die sich aus vielen Einzeltomen zusammensetzen (vgl. Tipler/Mosca, 2006, S.1224).

<sup>36</sup>Im Vergleich bedeutet diese Größenangabe etwa eine äquivalente Masse und Anzahl von  $10^{10}$  Elektronen (vgl. hierzu Tabelle zur Umrechnung von Grehn/Krause, 2009, S.575).

### 3 Das quantenmechanische Messproblem

Das quantenmechanische Messproblem kann von verschiedenen Seiten aus beschrieben werden, da das Begriffspaar nicht exakt auf einen speziellen Aspekt festgelegt ist. Der Fokus des Problems soll daher auf der *Schrödingergleichung* liegen, deren Ausführungen jedoch nicht mathematisch, sondern beschreibend sein sollen.<sup>37</sup> Durch die Verbindung der Theorie der Quantenmechanik mit dem praktischen Versuch, der von JÖNSSON durchgeführt wurde, ergibt sich schließlich das Problem der Messung innerhalb der nichtrelativistischen Quantenmechanik.

Der *Welle-Teilchen-Dualismus* lässt es nicht zu, dass die Natur eines Quantenobjekts klassisch bestimmt werden kann. Dieses weist in unterschiedlichen Situationen auch unterschiedliche Eigenschaften auf und macht so eine genaue Bestimmung des Objektes (im klassischen Sinne als Teilchen oder Welle) unmöglich. Ferner ist die Genauigkeit einer Messung durch die *Unschärferelation* bestimmt, welche ebenfalls explizite Aussagen über die Eigenschaften des Objekts unmöglich macht. Beim Betrachten von SCHRÖDINGERS Wellenfunktion<sup>38</sup> zeigen sich diese Punkte und lassen sich noch stärker ausführen, weshalb sich das Problem der Messung in dem 'Kollaps der Wellenfunktion' wiederzufinden ist:

„Ohne Messung wird die zeitliche Entwicklung eines Zustandes stetig und determiniert durch die Schrödingergleichung beschrieben. Zur Beschreibung eines Messvorgangs muss der Überlagerungszustand durch einen der Einzelzustände ersetzt werden. Dieser Übergang wird nicht durch die Schrödingergleichung beschrieben, sondern er erfolgt sozusagen „von Hand“, also unstetig und wird deshalb auch *Kollaps der  $\psi$ -Funktion* genannt.“ (Küblbeck/Müller, 2003, S.108, Hervorhebung im Original)

Mit einer Messung, wie bspw. der Bestimmung des Ortes eines Elektrons auf dem Schirm in JÖNSSONS Versuch, wird der Zustand des Elektrons zwar exakt beschrieben, allerdings stößt die klassische Beschreibung an ihre Grenze. Die *Schrödingergleichung* ist die zeitliche Entwicklung des

---

<sup>37</sup>Hier geht es nicht um eine (Er-)Klärung des mathematischen Formalismus, sondern vielmehr um die wesentlichen Aspekte, die sich hieraus ergeben. Diese finden sich - und deshalb auch die Verbindung zum Experiment JÖNSSONS - phänomenologisch manifestiert wieder.

<sup>38</sup>Anmerkung: Die Wellenfunktion wird auch als  $\psi$ -Funktion bezeichnet (siehe Zitat).

Quantensystems (vgl. Esfeld, 2012a, S.466, im Glossar) mit ihrem elementaren Bestandteil der Wellenfunktion. Sie setzt sich erstens aus der Komponente für Welleneigenschaften - der Wellenfunktion - und zweitens aus der Komponente für Teilcheneigenschaften zusammen.<sup>39</sup> Die Wellenfunktion ist in der *Schrödingergleichung* das „Objekt, das in der Quantenmechanik den Zustand eines Quantensystems repräsentiert und alles beinhaltet, was wir über das Quantensystem wissen können“ (ebd., S.469, im Glossar). Als allgemeine dynamische Beschreibung für einzelne Quantenobjekte umfasst sie alle statistischen Möglichkeiten des Systems - die Gleichung versagt jedoch in dem Augenblick der Messung, der ein genaues Ergebnis liefert.

Mit der Wahrscheinlichkeitsfunktion werden alle Möglichkeiten des Quantenobjekts statistisch bestimmt. Diese Verteilung aber kollabiert, weil eine genaue Bestimmung des Objekts durch die Messung nun mit 100% verlangt wird. Praktisch bedeutet das im Fall des Experiments von JÖNSSON, dass das Elektron, welches auf den Schirm trifft, mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit an manchen Orten eher (helle Streifen in Abb. 6) und an manchen Orten weniger (dunkle Streifen) anzutreffen sein wird. Für ein einzelnes Elektron gibt es diese Wahrscheinlichkeit nicht mehr, sondern es wird genau mit einer einzelnen Wahrscheinlichkeit, nämlich zu 100%, an einer schwarzen Stelle auf der Fotoplatte bestimmt.

Wie bereits angedeutet existiert nicht das einzelne Problem der quantenmechanischen Messung, sondern es resultiert aus verschiedenen Formulierungen innerhalb der Theorie, aber auch in praktischen Versuchen (Ergebnisse des Doppelspaltversuchs) und in weiterführenden Gedankenexperimenten (Welcher-Weg-Experiment). Allgemein und zusammenfassend lässt sich jedoch folgendes formulieren:<sup>40</sup>

Das Problem der Messung in der Quantenmechanik besteht darin, dass eine umfassende und experimentell exakte Bestimmung eines Quantenobjekts nicht möglich ist.

---

<sup>39</sup>Anmerkung: Als hinreichender fachlicher Verweis soll es genügen, dass SCHRÖDINGER bei der Entwicklung der Gleichung als Ausgangslage die energetische Gleichung für Teilchen nahm und auf mathematischem Wege die dynamische Wellenbeschreibung dort einarbeitete (vgl. Hund, 1984, S.154ff.).

<sup>40</sup>Der Begriff des 'quantenmechanischen Messproblems' wird an dieser Stelle allgemein besprochen, während die vorherigen speziellen Differenzierungen im späteren Verlauf bei den philosophischen Aspekten wieder aufgegriffen werden.

## Teil II

# Philosophische Aspekte

Die im vorangegangenen Teil beschriebene Theorie der Quantenmechanik wurde anhand von drei herausgestellten Charakteristika beschrieben (vgl. Kap. 1.3 auf Seite 4): mit der *Schrödingergleichung* als grundlegendem mathematischen Formalismus, der Ergänzung durch die *Unschärferelation* und dem Prinzip des *Welle-Teilchen-Dualismus*. Alle drei Charakteristika bieten Möglichkeiten zur Ausführung des quantenmechanischen Messproblems (vgl. Kap. 3 auf Seite 17) und sollen im Nachfolgenden Ansatzpunkte für philosophische Ausführungen sein.

Mit der sprachlichen Analyse des Arbeitsthemas 'philosophische Aspekte des quantenmechanischen Messproblems' ergibt sich, im Hinblick auf die Begriffe, eine Fokussierung auf drei wesentliche Teile: die Theorie der Quantenmechanik, die Messung durch den Naturwissenschaftler und das resultierende Problem. Diese sprachlichen Verweise dienen als Grundlage für die an sie anknüpfenden philosophischen Aspekte, die mit den Charakteristika der physikalischen Grundlage verbunden werden.

Zunächst soll eine allgemeine Einordnung der drei begrifflichen Teile im Hinblick auf die Naturwissenschaften stattfinden. An diese Ausführungen anknüpfend ergeben sich dann die drei wesentlichen Merkmale, die im Hauptteil dieser Arbeit stehen werden: THOMAS S. KUHNs Theorieentwicklung (vgl. Kap. 4.1 auf Seite 23), KARL R. POPPERS unproblematische Quantenmechanik (vgl. Kap. 5 auf Seite 37) und MICHAEL ESFELDS Sichtweise des Strukturenrealismus (vgl. Kap. 6 auf Seite 50).

## Analyse der Theorie

Beginnend mit der Frage, was Naturwissenschaftler eigentlich tun, zeigt PETER KÜGLER in seinem Abschnitt 'Zur Geschichte Naturwissenschaftlicher Methoden' (Kügler, 2001, S.161-164) kurz umrissen verschiedene Stationen der Arbeitsweisen in den Naturwissenschaften. Grundsätzlich geht es darum, wie es der Begriff 'Naturwissenschaft' bereits nahe legt, aus der Natur eine Wissenschaft zu machen. In der Antike zeigte sich dies bei Platon darin, „zwischen praktischem und theoretischem Wissen [zu] unterscheiden“ (ebd., S.161). Im Mittelalter wurde diese Unterscheidung - im Bezug auf die moderne Naturwissenschaft - von FRANCIS BACON „ein Zusammenspiel von Theorie und Empirie“ (ebd., S.163). Als Übergang in die Moderne findet ebenfalls eine Kopplung geistiger und materieller Welt statt, die in einem von GALILEO GALILEI „angeregte[m] Einsatz der Mathematik zur Beschreibung der Wirklichkeit“ (ebd., S.164) aufgenommen wurde und auch in den gegenwärtigen Naturwissenschaften anzutreffen ist. Anhand dieser historischen Beispiele lässt sich eine Entwicklung der Naturwissenschaft ablesen, welcher jedoch immer noch das allgemeine Ziel hat, die Natur zu begreifen und zu beschreiben. Zwar erscheint diese Darstellung nicht vollkommen, sie fokussiert aber darauf, die Natur als Objekt - für den Wissenschaftler als Subjekt - verständlich zu machen.

Der Verständnisprozess des Wissenschaftlers über der Natur ist durch wissenschaftliche Theoriebildung als wesentliches Element gekennzeichnet. Somit stellt sich die Frage, wie sich die Quantenmechanik als Theorie entwickelt hat, wie sie zu verstehen ist und was sie ermöglicht. Ihre Beschreibung, wie sie im Grundlagenteil vorgenommen wurde, ist als historische Rekonstruktion zu verstehen. Eine solche Betrachtung schließt sich an das naturwissenschaftliche Konzept von THOMAS S. KUHN an, um die Entwicklung von Theorien verstehen zu können (vgl. Kuhn, 1991, S.16). Mit der Einordnung der quantenmechanischen Theorie als neue Grundlage der Physik, ergaben sich jedoch in ihrem späteren Verlauf gewisse Probleme, die Thema der *Kopenhagener Deutung* der Quantentheorie waren. Die Entwicklung der Quantentheorie, am besonderen Beispiel der *Schrödingergleichung*, wird in den Ausführungen zu KUHN (Kap. 4 auf Seite 23) Thema sein, im Speziellen auch auf die Interpretationen eingehen und auf mögliche Schwierigkeiten des quantenmechanischen Messproblems von theoretischer Seite aus hinweisen.

## Analyse der Messung

Die Messung, als offensichtlicher Bestandteil der Forscherarbeit, wird von IAN HACKING in einem Kapitel der 'Einführung in die Philosophie der Naturwissenschaften' ausgeführt (vgl. Hacking, 1996, S.384-405). Als besondere Entwicklung der naturwissenschaftlichen Theorien ergibt sich in den letzten Jahrhunderten, so HACKING, eine zunehmende Mathematisierung von Messungen (vgl. ebd., S.386). Es entwickelten sich unterschiedliche Motivationen dieses praktischen Verfahrens, wie die Bestimmung von Naturkonstanten (vgl. ebd., S.387) und als Theorie mit anderen Mitteln (vgl. ebd., S.393ff.). Im Hinblick auf die Funktion und Bedeutung der Messung verweist HACKING auf KARL R. POPPER, der spezielles Augenmerk auf das Experiment lege, welches „dazu gedacht [sei], Theorien zu prüfen“ (ebd., S.400). Sie ist nicht nur eine allgemeine Beschreibung eines wissenschaftlichen Vorgangs, sondern kann in diesem speziellen Fall auch eine eigenständige Rolle in einem wissenschaftstheoretischen Konzept einnehmen.

Mit dem Verweis auf die besondere Stellung der Messung soll ihre Bedeutung innerhalb des Konzepts von POPPER klar gemacht werden (vgl. Kap. 5 auf Seite 37). Darüber hinaus sind seine Ausführungen zur Quantenmechanik von Interesse, die den Messvorgang durch eine statistische Sichtweise als unproblematisch erscheinen lassen, was an den Ausführungen POPPERS zur *Unschärferelation* deutlich wird.

## Analyse des Problems

An und für sich erscheint die Theorie der Quantenmechanik, die sich aus vielen verschiedenen Einflussfaktoren heraus gebildet hat, unterschiedlich auszulegen zu sein. Eine widerspruchsfreie Beschreibung und schlüssige Erklärung, wie sie HAUGK und FRITSCHKE versuchen (vgl. Haugk/Fritsche, 2012, S.6), wird in der Beschreibung der Quantenmechanik, wie sie sie vornehmen, nur unter der Annahme von Prämissen möglich. In erster Linie geht es ihnen um die klare Benutzung und Definition von Begriffen, sodass verschiedene Aspekte nicht hinterfragt werden können, wonach Elektronen bspw. als echte Teilchen (und nicht verschmiert oder wellenförmig) anzusehen seien (vgl. ebd., S.9). Mit dieser Darstellung der Theorie, als möglicher Blick auf die Welt, ergibt sich ein völlig anderes Bild als es die Darstellung der Grundlagen vermuten lässt.

„Die Welt existiert objektiv und außerhalb unseres Bewusstseins“ (ebd., S.10, Hervorhebung im Original) ist eine der Annahmen, unter welcher die Theorie schließlich unproblematisch zu betrachten sei. Der Gedanke, eine realistisch existierende Außenwelt anzunehmen, liegt den Autoren anscheinend sehr am Herzen, weshalb ein realistisches Weltbild, welches auch POPPER annimmt, vertreten wird. Im Hinblick auf die Position, dass die Theorie, durch die Annahme von Elektronen als echten Teilchen, besser geklärt wird, steht jedoch im Widerspruch zum *Welle-Teilchen-Dualismus*. Dennoch gibt es Möglichkeiten im erkenntnistheoretischen Bereich, ein realistisches Weltbild zu wahren, ohne sich in Widersprüche mit der Physik zu verstricken. In diesem Kontext soll so im letzten Kapitel des Hauptteils (Kap. 6 auf Seite 50) die Position von MICHAEL ESFELD vorgestellt werden, die mit den Forderungen der Physiker nach einem realistischen Weltbild im Einklang stehen kann, ohne das Elektron in das Spannungsfeld zwischen Welle und Teilchen zu bringen.

## 4 Theorie

### 4.1 Wissenschaftliche Revolution

Die Entwicklung von wissenschaftlichen Theorien, wie sie nach THOMAS S. KUHN verläuft, vollzieht sich dynamisch und lässt sich historisch verstehen. Wie IAN HACKING den Ablauf dieser Entwicklung kurz zusammenfasst, ist es die Abfolge von „*Normalwissenschaft, Krise, Revolution, neue Normalwissenschaft*“ (Hacking, 1996, S.23f., Hervorhebung im Original). Mit diesen speziellen Termini benennt KUHN die Abschnitte von wissenschaftlichen Entwicklungsstadien. Um die Entwicklung zu beschreiben, steht als Ausgangslage ein sogenanntes Paradigma einer Wissenschaft. Mit diesem Begriff ist eine „Errungenschaft“ (ebd., S.28) gemeint, die das gefestigte Modell der aktuellen Theorie betrifft.<sup>41</sup> Die normale Wissenschaft ist die sich anschließende Forschung, „die fest auf einer oder mehreren wissenschaftlichen Leistungen der Vergangenheit beruht, Leistungen die von einer bestimmten wissenschaftlichen Gemeinschaft eine Zeitlang als Grundlagen [bzw. als Paradigmata] für ihre weitere Arbeit anerkannt werden“ (Kuhn, 1991, S.25). Somit ist sie das Tätigkeitsfeld, in welchem alle bisherigen und neuen Phänomene auf Grundlage des Paradigmas gedeutet bzw. aufgeräumt würden (vgl. ebd., S.38). „Normalwissenschaftliche Forschung ist [...] auf die Verdeutlichung der vom Paradigma bereits vertretenen Phänomene und Theorien ausgerichtet“ (ebd.). Ferner nimmt sie geringfügige Reparaturen an der jeweils gängigen Theorie vor, löse vorhandene Rätsel, formuliert die Theorie mathematisch aus und nimmt technische Anwendungen vor (vgl. Hacking, 1996, S.24). Die Ausgangslage für die Entwicklung stellt somit eine Wissenschaft dar, die auf der Grundlage einer vorherrschenden Theorie basiert.

Der erste Schritt der Entwicklung, hin zu einer neuen Theorie, „beginnt mit dem Bewußtwerden einer Anomalie, das heißt mit der Erkenntnis, daß die Natur in irgendeiner Weise die von einem Paradigma erzeugten, die normale Wissenschaft beherrschenden Erwartungen nicht erfüllt hat“ (Kuhn, 1991, S.65f.). Mit dem Auftreten eines Phänomens, welches sich nicht im Rahmen der Theorie beschreiben lässt, wird die normale Wissenschaft in eine Krise gestürzt (vgl. ebd., S.80), die eine notwendi-

---

<sup>41</sup>Anmerkung: HACKING weist auf die unterschiedliche Verwendung des Begriffs 'Paradigma' hin (vgl. Hacking, 1996, S.28). KUHN selbst bekennt, dass ein besseres Wort fehle und er dem 'Paradigma' verschiedenste Aspekte zuschreibe (vgl. Kuhn, 1991, S.37). Als Umriss eines vorherrschenden wissenschaftlichen Schemas soll jedoch die hier gewählte Variante genügen.

ge Voraussetzung für „das Auftauchen neuer Theorien [ist]“ (ebd., S.90). Zwar wird es Versuche geben, das bestehende Paradigma aufrecht zu erhalten, aber der erste Anstoß zur Revolution wird durch eine bleibende Krise unaufhaltsam sein. „Alle Krisen beginnen mit der Aufweichung eines Paradigmas und der sich daraus ergebenden Lockerung der Regeln für die normale Forschung“ (ebd., S.97). Eine Krise ist notwendigerweise, aufgrund der Lösungssuche, mit der „Erfindung neuer Theorien“ (ebd., S.79) verbunden. Die dadurch aufkeimenden neuen Paradigmen versuchen die Anomalie zu erklären und schaffen einen ganzen theoretischen Neubau (vgl. ebd., S.98f.), mit dem Ziel, sich gegen die konkurrierenden Theorien bzw. Paradigmen durchzusetzen. Die neuen ungefestigten Paradigmen versuchen jeweils auf bessere Weise die Probleme der entstandenen Krise - sprich die ungeklärten Phänomene - auf Grundlage einer neuen Theorie zu klären. In diesem Zuge wird sich eine der neuen Theorien gegenüber einer Konkurrierenden durchsetzen und allmählich auch das alte Paradigma verdrängen. „Während die neue Theorie rasche Fortschritte macht, werden die früheren Ideen verworfen. Eine *Revolution* hat stattgefunden“ (Hacking, 1996, S.25, Hervorhebung im Original). Mit der Revolution und dem Ende der Krise wird die neu aufgestellte Theorie zum grundlegenden Paradigma der Wissenschaft. Dies setzt auch einen neuen Prozess der normalen Wissenschaft in Gang, der wiederum versucht Phänomene unter das neue Paradigma zu subsumieren - der Kreislauf der wissenschaftlichen Revolution beginnt von vorne.

KUHN beschreibt diesen stetigen Wandel von Theorien, wie eingangs erwähnt, sehr dynamisch. Die einzelnen Abschnitte der Theorieentwicklung lassen sich nicht unbedingt so klar trennen, wie in diesem Abriss dargestellt, sodass es bspw. zu Überlappungen einzelner Phasen kommen kann. Die detaillierten Ausführungen KUHNs sind jedoch insofern interessant, als dass sie auf die Quantenmechanik angewandt werden können und gewisse Punkte ihrer Theorieentwicklung von einem Standpunkt her beleuchten, der das quantenmechanische Messproblem in einem anderen Licht erscheinen lässt.

## 4.2 Theoriebildung der Quantenmechanik

### 4.2.1 Quantenmechanische Revolution

Um den Wandel einer Theorie zu verstehen und Revolutionen auszumachen, eigne sich nach KUHN ein Blick auf die Geschichte der Wissenschaft (vgl. Kuhn, 1991, S.15) und den damit verbundenen Experimenten, den Überlegungen und schließlich den auch aufkommenden Neuerungen. Die Darstellung der quantenmechanischen Theorie wurde deshalb an ausgewählten Entwicklungspunkten vorgenommen, um ihr Wesen zu charakterisieren, die Entwicklung verschiedener Ideenstränge aufzuzeigen und dabei möglichst unvoreingenommen zu sein. Hierzu wurde „nach anerkannten Prinzipien und Regeln [gesucht]“ (ebd., S.57), die das Paradigma der Quantenmechanik vornehmlich beschreiben. Wie KUHN erwähnt, sei die Suche nach solchen Regeln schwierig und teilweise unbefriedigend (ebd.), weshalb die gewählte Form der quantenmechanischen Theorie bereits auf ausgewählte Elemente fokussiert. So verhält es sich bspw. im Fall der *Schrödingergleichung*, an welcher sich die Revolution geeignet darstellen lässt.<sup>42</sup>

In der Physik entwickelte sich über einige Jahre hinweg eine Krise, weil die Idee des Wirkungsquants von PLANCK in einen Teilbereich der Physik implementiert wurde. Dies zog Weiterentwicklungen durch EINSTEIN und BOHR nach sich und weitete sich schließlich auf die gesamte Physik aus. Schließlich war Mitte der 1920er Jahre klar, dass sich Teilchen wie Wellen verhalten können, aber eine mathematische Beschreibung dieser Deutung der Natur fehlte. Dies änderte sich jedoch und die Quantenmechanik lag schließlich auch als mathematischer Formalismus vor, mit dem es möglich war die bisherigen Vorgänge zu lösen und adäquat zu beschreiben.<sup>43</sup> Bemerkenswert ist, dass WERNER HEISENBERG 1925 die erste mathematische Formulierung erarbeitet hat (vgl. Hund, 1984, S.136) und wenige Monate später „vier anscheinend äquivalente Formen [vorlagen]“ (ebd., S.175). Während HEISENBERG seine Gedanken nicht weiter verfolgt hat (vgl. Gribbin, 1996a, S.118f.), hätten MAX BORN und PASCUAL JORDAN 1925 ihre Matrizenmechanik als Möglichkeit der

---

<sup>42</sup>Anmerkung: KUHN selbst sieht die Quantenmechanik als neues Paradigma (vgl. Kuhn, 1991, S.63).

<sup>43</sup>Die beschriebenen Entwicklungen sind an dieser Stelle etwas verkürzt dargestellt. Sie ereigneten sich über knapp 25 Jahre hinweg, was es schwierig macht, eine klare Trennlinie aufzuzeigen und in KUHNs Sinne darauf zu verweisen. Im Fokus steht hier der Formalismus, der eine Anwendung ermöglicht und bisherige Probleme löst (bspw. in BOHRs Atommodell die Annahme der festen Bahnen).

mathematischen Beschreibung entwickelt (vgl. ebd., S.122). Im gleichen Jahr hat PAUL DIRAC, angestoßen durch die Überlegungen der anderen, seine Form als Quantenalgebra publiziert (vgl. ebd., S.124). Mit gewissen Schwierigkeiten hatte SCHRÖDINGER bei seiner Formulierung zu kämpfen, die im Jahr 1926 als bekannte Wellenmechanik<sup>44</sup> folgte (vgl. ebd., S.127). Während all diese mathematischen Formalismen zunächst nebeneinander standen, wurde innerhalb der Physikergemeinde klar, „daß die verschiedenen Gleichungen einander exakt äquivalent und nur unterschiedliche Ansichten der gleichen mathematischen Welt waren“ (ebd., S.129). Die Entwicklung neuer Theorien deutet, im KUHNschen Sinn, auf eine Krise hin, in der zu einer Zeit viele unterschiedliche Schemata entwickelt werden, um das vorhandene Problem zu lösen. Dass dies darin bestand, eine zutreffende mathematische Beschreibung der dualistischen Natur zu bekommen, kam der Gleichung SCHRÖDINGERS entgegen, da „die Physiker der [19]20er Jahre jene Gleichungen bevorzugten, die ihnen am vertrautesten waren, nämlich die von Schrödingers Wellen“ (ebd.). Dem mathematischen Formalismus folgte kurz darauf die physikalische Interpretation, woraufhin sich eine Revolution abzeichnete und die Theorie abgeschlossen<sup>45</sup> wurde:

„Damit war die widerspruchsfreie Theorie der Quantenmechanik in einer Form abgeschlossen, in der sie von jedem fähigen Physiker benutzt werden konnte, um Probleme mit Atomen und Molekülen zu lösen, ohne sich über fundamentale Fragen den Kopf zerbrechen zu müssen; er mußte lediglich bereit sein, dem Kochbuch zu folgen und die Antworten herzustellen.“ (Gribbin, 1996a, S.136)

Die anfänglichen Probleme mit der Wärmestrahlung, die PLANCK versuchte zu lösen, gipfelten in ihren weiteren Überlegungen schließlich in unterschiedlichen Schwierigkeiten.<sup>46</sup> Mit dem mathematischen Formalismus, der schließlich die Quantennatur korrekt beschrieb, wurde ei-

---

<sup>44</sup>Die wiederum Teil der *Schrödingergleichung* ist (vgl. hierzu 1.3 auf Seite 7). Die Bezeichnung der Wellenmechanik hebt den Wellenaspekt und den klassischen mechanischen Anteil bereits in ihrer Bezeichnung hervor und soll im Nachfolgenden sprachlich nicht von der *Schrödingergleichung* unterschieden werden.

<sup>45</sup>Nicht alle Physiker waren dieser Ansicht. So wird an einigen Stellen deutlich, dass EINSTEIN an einer Weiterentwicklung der Theorie gelegen war (vgl. Bohr, 1979, S.142ff.).

<sup>46</sup>Anmerkung: Für die problematische Situation während der Entwicklung sei auf die fachlichen Ausführungen von BOHR hingewiesen (vgl. Bohr, 1979, S.119f.).

ne praktische Anwendung möglich. Daran schloss sich eine Wiederaufnahme der normalen Wissenschaften an, deren Grundlage künftig das Paradigma der Quantenmechanik sein sollte. Mit dem Lösen der Krise um den Formalismus kam die Revolution durch SCHRÖDINGERS Wellenmechanik, die „rückblickend angesehen werden [kann] als eine zunächst formale Abänderung der klassischen Mechanik von Partikeln“ (Gribbin, 1996b, S.143). Die Kopplung von Teilchen- und Welleneigenschaften in der *Schrödingergleichung* verbindet somit auch die jeweiligen Vorstellungen zum Teilchen- und Wellenbild, was sich in einem Dualismus der Vorstellung äußert. Die beiden gekoppelten Bilder der klassischen Physik fanden Eingang in die erste Interpretation der Quantenmechanik, die formuliert wurde, um die Theorie besser verstehen zu können.<sup>47</sup>

Mit einer wissenschaftlichen Revolution geht, so KUHN, eine Änderung des Weltbildes einher: „Wenn auch die Welt mit dem Wechsel eines Paradigmas nicht wechselt, so arbeitet doch der Wissenschaftler danach in einer anderen Welt“ (Kuhn, 1991, S.133). Die Welt ändert sich nicht faktisch, sondern der Wissenschaftler interpretiert sie nun von einem anderen Standpunkt heraus (vgl. ebd., S.134). Mit einem neuen Paradigma, „ist klar, daß wir ein neues Vokabular und neue Begriffe für die Analyse von Ereignissen [benötigen]“ (ebd., S.68). Im Fall der Quantenmechanik wurde das neue Paradigma vor ein Verständnisproblem gestellt, da sich die verwendeten Begriffe aus der klassischen Physik herleiteten. In der *Kopenhagener Deutung* wird darauf bestanden, Vorgänge klassisch zu beschreiben. Und mehr noch: Durch das Prinzip der Komplementarität ist ein Verständnis des Naturvorgangs dadurch möglich, dass im einen Fall das Bild des Teilchens und im anderen Fall das Bild der Welle herangezogen wird. Das neue Paradigma, welches sich 1927 als abgeschlossene Theorie der Quantenmechanik darstellte, schien zwar in sich geschlossen, barg jedoch verschiedene Probleme, da es den Anschein hatte, dass sich manche Physiker in unterschiedlichen Welten befanden. Dies zeigte sich bspw. darin, als „HEISENBERG erkannte, daß BOHR und SCHRÖDINGER sich vor allem deshalb gelegentlich uneins waren weil sie von unterschiedlichen Begriffen ausgingen“ (Gribbin, 1996a, S.171, Namen nachträglich hervorgehoben). Eine Verständigung der Physiker führte so zur ersten Interpretation der Theorie (*Kopenhagener Deutung*) auf der fünften Solvay Konferenz im Jahr 1927.

---

<sup>47</sup>Vgl. hierzu Kap. 4.2.2 auf der nächsten Seite.

## 4.2.2 Kopenhagener Deutung

HEISENBERG beginnt seine Darstellung der *Kopenhagener Deutung* mit dem Paradoxon, dass „[j]edes physikalische Experiment [...] in den Begriffen der klassischen Physik beschrieben werden [müsse]“ (Heisenberg, 1979, S.42), da diese die Sprache der Versuchs- und Ergebnisbeschreibung liefere (vgl. ebd.). Während die Sprache der klassischen Physik sich auf genaue mathematische Werte beziehe und mit einer Bewegungsgleichung für Teilchen arbeite, gestalte sich dies für die Quantentheorie (bzw. Quantenmechanik) anders (vgl. ebd., S.42f.). In ihr könne nur die „experimentelle Situation zur Zeit der Messung“ (ebd., S.43) in Form der Wellen- bzw. Wahrscheinlichkeitsfunktion dargestellt werden. Was er an dieser Stelle beschreibt, ist der Bruch in der Möglichkeit der Beschreibung, dass sich klassische Aussagen, wie die genaue (gleichzeitige) Bestimmung von Ort und Geschwindigkeit<sup>48</sup>, im Bereich der Quantenmechanik nun nicht mehr treffen lassen, da hier die Wahrscheinlichkeit vorherrscht. Wie soll nun also die Messung beschrieben werden?

„[Es] erfordert die theoretische Deutung des Experimentes drei deutlich unterschiedene[r] Schritte. Im ersten wird die experimentelle Ausgangssituation in eine Wahrscheinlichkeitsfunktion übersetzt. Im zweiten wird diese Funktion rechnerisch im Laufe der Zeit verfolgt. Im dritten wird eine neue Messung am System vorgenommen, deren zu erwartendes Ergebnis dann aus der Wahrscheinlichkeitsfunktion berechnet werden kann.“ (Heisenberg, 1979, S.45)

Zum besseren Verständnis lässt sich die Analogie vom klassischen Experiment zum Quantenexperiment heranziehen<sup>49</sup>: Der Versuch wird aufgebaut, in die Startposition gebracht und alle Ausgangswerte bestimmt (wie bspw. bei JÖNSSON die Abstände der Spalte oder die Geschwindigkeit der Elektronen). Danach folgt die Versuchsdurchführung, gefolgt von dem Ergebnis (wie bspw. die Schwarzfärbung der Fotoplatte). Dieses Experiment lässt sich für ein Teilchen auch theoretisch durchdenken: Ein Teilchen wird mit einer bestimmten Geschwindigkeit von Punkt A zu Punkt B geschossen. In diesem Bild lässt sich der Ort des Teilchens

---

<sup>48</sup>Vgl. hierzu die *Unschärferelation* in Kap. 1.3 auf Seite 6.

<sup>49</sup>Anmerkung: HEISENBERG benutzt auch eine Analogie, jedoch etwas komplexer (vgl. Heisenberg, 1979, S.46ff.).

(und dessen Verlaufsbahn) zu jedem Zeitpunkt genau bestimmen. Für die Quantenmechanik und die Wellenbeschreibung von Teilchen verhält es sich jedoch anders. Mit der obigen Beschreibung wird das betrachtete System in die Wahrscheinlichkeitsfunktion übersetzt, zeitlich entwickelt (man könnte sagen, die Dauer des Messens durchlaufen) und schließlich herausgestellt, welches Ergebnis die Funktion liefert. Sie wird - ähnlich wie der klassische Formalismus auch - ein numerisches Ergebnis des Ortes liefern.

Genau genommen handelt es sich im Falle der Messung um zwei aufeinanderfolgende Beobachtungen an einem System. In der klassischen Mechanik ist es möglich, eine Beschreibung des Vorgangs zwischen diesen beiden Beobachtungen zu geben. Dagegen „ist [es in der Quantenmechanik] ganz allgemein unmöglich, anschaulich zu beschreiben, was zwischen zwei aufeinanderfolgenden Beobachtungen geschieht“ (ebd., S.47). Dieser besondere Umstand stellt einen der Umbrüche zur klassischen Beschreibung dar, an dessen Stelle HEISENBERG auch die Bedeutung der klassischen Begriffe hervorhebt, die zur Beschreibung von Experimenten notwendig sind.

Mit dem besonderen Verweis auf BOHR wird ein weiterer Punkt der *Kopenhagener Deutung* vorgebracht, die darauf abzielt, die klassische mit der quantenmechanischen Vorstellung zu vereinen: durch „Komplementarität“ (ebd. S.49). Mit der Teilchenvorstellung auf der einen und der Wellenvorstellung auf der anderen Seite<sup>50</sup> solle man beide komplementären Bilder nutzen, um sich die Vorgänge zu verdeutlichen (vgl. ebd., S.48f.).

Die vorgeschlagene Interpretation der Quantenmechanik soll zu ihrem Verständnis beitragen und eine Möglichkeit der Vorstellung eröffnen. Während die Komplementarität ein dichotomisches Bild (im Sinne der klassischen Physik) schafft, wird aus den getrennten Beobachtungen während der Messung deutlich, dass eine raum-zeitliche Vorgangsbeschreibung unmöglich ist. Darüber hinaus ist, nach BOHR, eine Trennung zwischen dem quantenmechanischen Objekt, welches durch die *Schrödingergleichung* beschrieben wird, und der Umgebung (der Messapparatur und dem Beobachter) nur schwer zu ziehen (vgl. Bohr, 1979, S.135). Weil die Messapparatur mit in „die gesamte Versuchsanordnung miteinbezogen [werden soll]“ (ebd., S.133, Hervorhebung im Original), ergibt sich im

---

<sup>50</sup>Vgl. auch hierzu den *Welle-Teilchen-Dualismus* in Kap. 1.3 auf Seite 4.

Hinblick auf den Beobachter ein gewisses Problem.<sup>51</sup> Im Zuge der *Kopenhagener Deutung* ist das quantenmechanische Messproblem als 'Kollaps der Wellenfunktion' beschrieben worden<sup>52</sup>, in welchem sich der mathematische Formalismus der statistischen Vorhersage durch die Messung verändert, indem er einen definitiven Wert annimmt. HEISENBERG formuliert dieses Problem treffend:

„Das ist allerdings ein sehr merkwürdiges Resultat, das zu zeigen scheint, daß die Beobachtung eine entscheidende Rolle bei dem Vorgang spielt und daß die Wirklichkeit verschieden ist, je nachdem, ob wir sie beobachten oder nicht.“ (Heisenberg, 1979, S.53)

### 4.2.3 Inkommensurabilität

Als Element einer wissenschaftlichen Revolution führt KUHN den Vergleich konkurrierender Theorien an, der über die Akzeptanz eines neuen Paradigmas entscheiden soll. Dieser Vergleich, der abschließend ein Paradigma bevorzugen soll, findet zwischen den konkurrierenden Vertretern der jeweiligen Theorie statt und ist sehr vielschichtig. „Dieses Insistieren auf einem Vergleich von Theorien charakterisiert auch die geschichtliche Situation, in der eine neue Theorie angenommen wird“ (Kuhn, 1991, S.156). Die Prüfung einer neuen Theorie könne über eine Verifikation oder Falsifikation stattfinden (vgl. ebd., S.155) und müsse aus der traditionellen Beschreibung des jeweiligen Paradigmas heraus geschehen (vgl. ebd., S.157). Wenn jedoch die Vertreter unterschiedlicher Paradigmen sich darüber zu verständigen suchen, welches Paradigma nun im Zuge der wissenschaftlichen Revolution die Debatte für sich entscheiden soll, lässt sich ein spezifisches Element ausmachen, welches die Forscher vor eine gewisse Problematik stellt:

„Wir sind schon auf mehrere Gründe gestoßen, warum den Befürwortern konkurrierender Paradigmata eine vollkommene Gegenüberstellung der gegenseitigen Standpunkte nicht gelingen kann. Zusammenfassend sind diese Gründe als die Inkommensurabilität vor- und nachrevolutionären normal-wissenschaftlichen Traditionen beschrieben worden [...]“ (Kuhn, 1991, S.159)

---

<sup>51</sup>Der Beobachter soll zu den Ausführungen um die *Kopenhagener Deutung* hier eingeführt, jedoch erst in Kap. 5 auf Seite 37 bei der Messung nähere Beachtung finden.

<sup>52</sup>Vgl. hierzu Kap. 3 auf Seite 17.

Die Inkommensurabilität - zunächst salopp als Vergleichsproblematik von Theorien zu charakterisieren - zeichnet sich in drei wesentlichen Punkten aus: Erstens werden die Probleme der einzelnen Theorien nicht übereinstimmen, weil ihre Normen und Definitionen von einander abweichen (vgl. Kuhn, 1991, S.159). Zweitens werden die Begriffe und Verfahren einer neuen Theorie nicht exakt die gleiche Bedeutung haben, da sie in einem anderen Verhältnis zu einander stehen (vgl. ebd., S.160). Der dritte und grundlegendste Punkt ist der Wandel der Welt für die Wissenschaftler, sodass sich die Vertreter unterschiedlicher Paradigmen auch in unterschiedlichen Welten leben (vgl. ebd., S.161). Diese drei Charakteristika umschreiben den Begriff der Inkommensurabilität, der jedoch „zu den am meisten diskutierten und umstrittensten Stücken der Kuhnschen Theorie [zählt]“ (Hoyningen-Huene, 1989, S.202).<sup>53</sup>

Die Problemverschiebung der Inkommensurabilität bezieht sich auf „Probleme, deren Beantwortung für die ältere Traditionen von zentraler Bedeutung war“ (ebd., S.203), aus Sicht der neuen Tradition nun aber veraltet und unwissenschaftlich sein kann (vgl. ebd.). Die Begriffsverschiebung ist bei KUHN etwas differenzierter, sodass sie einerseits einen extensionalen und einen intensionalen Aspekt beinhaltet (vgl. ebd., S.204f.): Der extensionale Aspekt verschiebt den Begriff so, dass dieser sich nun mit einem anderen Begriff überlappt. Der intensionale Aspekt spricht den Begriffen eine andere Bedeutung zu, weil nun etwas anderes unter den Begriff fällt. Der fundamentale Punkt des Weltbildwandels betrifft „diejenige Region der Erscheinungswelt, in der die jeweilige Gemeinschaft ihre Arbeit ausübt“ (ebd., S.197) und somit das Bild der Welt, welches der Wissenschaftler von ihr hat. Damit einher gehen drei Modi der Änderung (vgl. ebd., S.197f.): neue Phänomene, die es in der alten Erscheinungswelt nicht gegeben habe, bisherige alte Phänomene, die nun in einem neuem Licht gesehen werden könnten und die Änderung bisheriger numerischer Daten.<sup>54</sup>

Die Interpretation der Theorie, auf die im Folgenden eingegangen werden soll, stellt sich als (kleiner) Teil der wissenschaftlichen Revoluti-

---

<sup>53</sup>Anmerkung: Im Postskriptum von 1969 verweist KUHN auf zwei aufgekommene Missverständnisse (vgl. Kuhn, 1991, S.209-216): die Unvergleichbarkeit von Theorien und die Implikation der Diskontinuität (vgl. hierzu auch Hoyningen-Huene, 1989, S.212-217).

<sup>54</sup>Hier sei hervorgehoben, dass im Prozess der Formulierung einer neuen Theorie die Weltbildänderung mit „der Verwendung von Instrumenten und der Interpretation von Daten“ (Hoyningen-Huene, 1989, S.197f.) zusammenhängt, also eine Interpretation herangezogen wird.

on und als Inkommensurabilität heraus. Wie ein altes Paradigma Daten interpretiert, dürfte im Zuge der Revolution nicht mit der Interpretation des neuen Paradigmas übereinstimmen, da die Paradigmen unterschiedliche Weltbilder umfassen. Als Element einer wissenschaftlichen Revolution zeigt sich die Inkommensurabilität zwischen dem alten Paradigma der Ausgangslage zur klassischen Physik und dem neuen Paradigma der Quantenmechanik (sowie deren Interpretation durch die *Kopenhagener Deutung*).

### 4.3 Inkommensurabilität und alternative Interpretationen

Da die Physiker anscheinend Interpretationshilfen für die widersprüchliche Quantenmechanik brauchen, wurde die *Kopenhagener Deutung* als erste Interpretation formuliert und fand auch ihre Resonanz im Kreise der physikalischen Gesellschaft. Mit der Interpretation der Quantenmechanik lässt sie sich nun als neues Paradigma herausstellen, die das alte Paradigma der klassischen Physik ablöste. Die Inkommensurabilität zwischen den beiden Paradigmen zeigt sich auch in den von KUHN davor angeführten Punkten: Problemverschiebung, Begriffsverschiebung und Weltbildwandel.

Für die Ausgangslage der klassischen Physik lag das Problem<sup>55</sup> in der Erklärung zur Wärmestrahlung. Während dieses Problem mit der Einführung der Quantentheorie langsam gelöst wurde und sich weitere Problemstellen auftaten, die mit zunehmender Präzisierung und schließlich dem mathematischen Formalismus gelöst wurden, hat sich die Problemlage der Quantenmechanik verschoben. Die Probleme der klassischen Physik wurden gelöst und durch die Schwierigkeiten des Beobachters im 'Kollaps der Wellenfunktion' abgelöst. In diesem Zuge haben sich auch die Begriffe etwas verschoben: Während in der klassischen Physik Vorgänge entweder zur klassischen Mechanik oder zum elektromagnetischen Feld zuzuordnen waren<sup>56</sup> (deren Eigenschaften konträr und unvereinbar waren), vereint die Quantenmechanik nun beide klassischen Begriffe in ihrer Beschreibung. Das Elektron bspw. lässt sich nämlich nun als Teilchen, aber auch gleichzeitig als Welle beschreiben und ansehen (was zuvor nicht der Fall war). Ein Weltbildwandel hat stattgefunden.

---

<sup>55</sup>Zumindest in der erwähnten Form dieser Arbeit in Kap. 1.2 auf Seite 3.

<sup>56</sup>Vgl. hierzu Kap. 1.1 auf Seite 1.

Die Problematik der Inkommensurabilität ist zwischen der klassischen Physik und der Quantenmechanik anzutreffen, sodass es Wissenschaftlern der unterschiedlichen Paradigmen schwer fällt, die Probleme des anderen zu verstehen, sich auf gemeinsame Begriffe zu einigen oder gar ein gemeinsames Bild der Welt zu teilen. Bei einer näheren Betrachtung fällt jedoch auf, dass die Änderungen der Begriffe und des Weltbildes, vornehmlich im Rahmen der *Kopenhagener Deutung*, sich nicht gravierend von einander unterscheiden und an dieser Stelle auch eine Inkommensurabilität bei den Vertretern des gleichen Paradigmas auftritt, die jedoch unterschiedliche Interpretationen davon haben. KUHN weist darauf hin, dass eine Prüfung des Paradigmas aus ihrer begrifflichen Tradition heraus vorgenommen werden muss (vgl. Kuhn, 1991, S.157). Die Verwendung der klassischen Begriffe findet jedoch nach wie vor statt und eine Interpretation und Beschreibung muss, nach HEISENBERG, im Begriffssystem der klassischen Physik geschehen. Daher lässt sich eine Begriffsverschiebung nur insofern ausmachen, als dass ein Elektron nun unter die beiden Begriffe von Teilchen und Welle gefasst werden kann (als intensionalen Aspekt der Begriffsverschiebung). Speziell die Vorstellung der klassischen Physik von der Trennung der Welt in Subjekt und Objekt, in Beobachter und Messgegenstand, wird im Zuge der Quantenmechanik zum Problem, da der Beobachter in der Messung anscheinend nicht vernachlässigt werden kann. So haben sich, trotz des neuen Paradigmas, unterschiedliche Interpretationen der Theorie entwickelt, anhand derer auch inkommensurable Bestandteile entdeckt werden können.

Das Kernproblem mit jeder Interpretation der Quantenmechanik besteht nach JOHN S. BELL darin, was alles in die quantenmechanische Wellenbeschreibung mit einbezogen werden muss (vgl. Bell, 2012, S.210f.). Je nach Interpretation werden Teile der Welt hinzugezogen, die im Versuch berücksichtigt werden müssen. Das Problem der Grenzziehung besteht jedoch nicht für den mathematischen Formalismus selbst, der ganz klassisch deterministisch ist (vgl. ebd., S.210):

„Was wir haben, ist ein mathematisches Rezept für die Ausbreitung der Wellen, und die Regel, dass die Wahrscheinlichkeit, ein Elektron an einem bestimmten Ort zu sehen [...] in Relation zur Intensität der Wellenbewegung dort steht.“ (Bell, 2012, S.209)

Im Doppelspaltversuch bedeutet dies eine zutreffende mathematische Beschreibung für die stochastische Verteilung der Elektronen auf der Fotoplatte. Das auftretende Problem, welches eine Interpretation verlangt, entsteht erst mit der Frage danach, wie das Verhalten der Elektronen am Spalt nun eigentlich aussieht und wie es sich beschreiben lässt.<sup>57</sup> In der *Kopenhagener Deutung*, vornehmlich formuliert von BOHR (vgl. ebd., S.213f.), wird dem Elektron eine ihm innewohnende Doppelnatur durch den *Welle-Teilchen-Dualismus* zugeschrieben und es verhalte sich entweder wie ein Teilchen oder wie eine Welle. Das Grundproblem, sieht BELL in dem Umstand, dass im einen Fall eine klassische Beschreibung und im anderen Fall eine quantenmechanische (Wellen-)Beschreibung vorliegt (vgl. ebd., S.210). Die Wahl der Beschreibung hängt davon ab, was nun in den eigentlichen Doppelspaltversuch mit einbezogen wird, also welche Teile quantenmechanisch beschrieben werden (vgl. ebd., S.213).

BELL benennt in seinen Ausführungen (vgl. ebd., S.205-219) sechs mögliche Interpretationen, die jeweils unterschiedliche Betrachtungen nach sich ziehen. Es lässt sich in diesem Kontext der Vorschlag von DE BROGLIES Führungswellen aus dem Jahr 1925 anführen, der Teilchen und Welle vereint:

„De Broglie zeigte im Detail, wie die Bewegung eines Teilchens, das nur durch eines von zwei Löchern im Schirm geht, durch Wellen beeinflusst werden könnte, die sich durch beide Löcher ausbreiten. Und so beeinflusst, dass das Teilchen nicht dorthin geht, wo sich die Wellen auslöschten, sondern dahin gezogen wird, wo sie kooperieren.“ (Bell, 2012, S.216)

Im Doppelspaltversuch von JÖNSSON<sup>58</sup> besitzt das Elektron, nach der *Kopenhagener Deutung*, eine Doppelnatur, die sich darin zeigt, dass sein Verhalten während des Vorgangs dem einer Welle entspricht. Der Indikator dafür ist das Interferenzmuster, welches sich auf der Fotoplatte

---

<sup>57</sup>Anmerkung: BELL weist darauf hin, dass die Wellenmechanik das Teilchen nur als Welle beschreibe und keine Interpretation als Teilchen enthalte (vgl. Bell, 2012, S.209).

<sup>58</sup>Anmerkung: Es ist zu bemerken, dass JÖNSSON den Begriff der 'Elektronenwelle' benutzt (vgl. Jönsson, 1961, S.454), um auf den Doppelcharakter hinzuweisen. Man könnte sagen, dass der Teilchencharakter bei ihm unterschlagen wird, da die Quelle dieser Elektronenwellen eine Beschleunigungsanlage (vgl. ebd., S.462) für freie 'Elektronen' darstellt, die nach einfachen mathematischen Prinzipien für die energetische Beschleunigung von greifbaren Objekten arbeitet (klassische Mechanik).

abzeichnet. Das Muster entsteht jedoch aus einzelnen Punkten, an welchen einzelne Elektronen aufgetroffen sind, woraus sich schließen lässt, dass das Elektron ein Teilchen ist. Die Vorstellung von DE BROGLIE vereint diese Doppelnatur und löst den Dualismus, sodass sich das Elektron genau dort befindet, wo seine 'Führungswelle' interferiert.

Im Kontext der *Schrödingergleichung* und der verschiedenen Interpretationen zeigt die KUHNsche Inkommensurabilität zwischen den einzelnen Interpretationen des Paradigmas unterschiedliche Weltbilder. Zunächst sei darauf hingewiesen, dass die verschiedenen Interpretationen das gleiche Paradigma, die Quantenmechanik, umfassen. Allerdings gibt es Hinweise darauf, dass die Theorie interpretiert werden muss und sich dieser Umstand als Konkretisierung des vorhandenen Paradigmas darstellt. So ist dem Physiker BOHR die „Mehrdeutigkeit [...], die den physikalischen Attributen der Objekte anhaftet [durchaus bewusst]“ (Bohr, 1979, S.145). Ihm ist die problematische Ausdrucksweise klar und er fordert eine unter den Wissenschaftlern gleichbleibende Verwendung der Begriffe (vgl. ebd., S.147f.). Dieser Vorschlag findet sich auch bei KUHN wieder, der eine reine Beobachtungssprache in Betracht zieht (vgl. Kuhn, 1991, S.138), aber davon überzeugt ist, dass ein solcher Vorschlag nicht möglich scheint (vgl. ebd., S.139). Deshalb obliegt es der Interpretation, „ein bereits vorhandenes Paradigma zu verfeinern, zu erweitern und zu artikulieren“ (ebd., S.134). Durch das Bewusstsein der Physiker um die sprachlichen Probleme und deren begriffliche Verwendung zeichnet sich, auch ohne neues Paradigma, eine gewisse Schwierigkeit innerhalb der Theorie ab. Ebenso zeigen sich unterschiedliche Weltbilder um das Elektron: Im Fall von BOHR hat es komplementäre Bilder, bei DE BROGLIE sind sie kumuliert. Obwohl beide Interpretationen auf dem gleichen Paradigma basieren, ist dennoch hervorzuheben, dass sich unterschiedliche Bilder des Elektrons<sup>59</sup> entwickeln.

Neben den hier vorgestellten Interpretationen würden sich noch einige weitere anführen lassen.<sup>60</sup> Diese zeichnen sich (wie zuvor erwähnt) dadurch aus, dass sie die Quantenwelt von der „klassischen“ Welt unterschiedlich abgrenzen. Im folgenden Kapitel soll die Sichtweise auf die Quantenmechanik von POPPER im Fokus stehen, in welcher sich eine solche Trennung zwischen Beobachter und Messobjekt nicht wirklich ziehen lässt. Sie beschreibt eine Sichtweise auf den Formalismus mit dem

<sup>59</sup>Vgl. hierzu die Ausführungen zum Elektron in Kap. 6.2.2 auf Seite 55.

<sup>60</sup>Diese umreist BELL kurz für sechs mögliche Welten der Quantenphysik (vgl. Bell, 2012, S.205-219).

Blick auf die Wahrscheinlichkeit und die spezielle Rolle der Messung, wodurch sich kein Messproblem abzeichnet. Schließlich soll diese alternative Sichtweise die Messung und den Beobachter in den Fokus rücken, deren Problematik bisher ungeklärt blieb.

## 5 Messung

### 5.1 Messung und Falsifikation

Im Forschungskonzept von KARL R. POPPER kommt der Messung eine besondere Rolle zu. Innerhalb seines Konzepts der Wissenschafts- und Erkenntnistheorie, welches er in 'Logik der Forschung' (Popper, 2002) entwickelt, wird die Messung im Kontext der wissenschaftlichen Forschung betrachtet und nimmt die Instanz der Überprüfung ein:

„Die Tätigkeit des wissenschaftlichen Forschers besteht darin, Sätze oder Systeme von Sätzen aufzustellen und systematisch zu überprüfen; in den empirischen Wissenschaften sind es insbesondere Hypothesen, Theoriensysteme, die aufgestellt und an der Erfahrung durch Beobachtung und Experiment überprüft werden.“  
(Popper, 2002, S.3)

In der Einführung verfolgt er den Gedanken, dass das Aufstellen einer wissenschaftlichen Theorie von zwei grundlegenden Problemen gekennzeichnet ist: dem Induktions- und dem Abgrenzungsproblem.<sup>61</sup> Innerhalb dieser Überlegungen bekommt anschließend das Experiment eine entscheidende Rolle innerhalb der empirischen Wissenschaften zugewiesen.

POPPER charakterisiert einleitend die übliche Auffassung empirischer Wissenschaften mittels der „sogenannte[n] induktive[n] Methode“ (ebd., S.3), die durch den Schluss von besonderen Sätzen auf allgemeine Sätze gekennzeichnet ist. Diese Auffassung teilt er nicht, denn das damit einhergehende Problem besteht darin, „ob und wann induktive Schlüsse berechtigt sind“ (ebd.). Seine Analyse dessen ergibt, dass eine Begründung dieser Induktionslogik fehlschlägt (vgl. ebd., S.4f.)<sup>62</sup> und somit unüberwindbare Schwierigkeiten birgt. Er möchte, um diese Schwierigkeiten zu umgehen, eine „Lehre von der *deduktiven Methodik der Nachprüfung*“ (ebd., S.5, Hervorhebung im Original) bevorzugen, in welcher sich Theo-

---

<sup>61</sup>Anmerkung: Dieser Gedankengang wurde aus seiner früheren Schrift 'Die beiden Grundprobleme der Erkenntnistheorie' (vgl. hierzu Popper, 1979) wieder aufgegriffen und bilden sozusagen die Ausgangslage der hierauf folgenden Erörterung, die in 'Logik der Forschung' (Popper, 2002) folgt.

<sup>62</sup>Anmerkung: Um das Induktionsproblem zu rechtfertigen, müsse man ebenfalls induktive Schlüsse höherer Ordnung zulassen, was in der Begründung des Prinzips zu einem unendlichen Regress führen würde (vgl. Popper, 2002, S.4f.).

rien an Einzelfällen messen müssen. Hierzu gibt es vier Möglichkeiten der Prüfung, die auf die innere Widerspruchsfreiheit, die logische Form, den fortschrittlichen Theorievergleich und die empirische Anwendung fokussieren (vgl. ebd., S.7f). Der letzte Punkt beinhaltet die praktische Überprüfung der Theorie, anhand derer singuläre Folgen die Theorie vorläufig verifizieren oder das gesamte System falsifizieren (vgl. ebd., S.8).

Im Zuge des Ablehnens der induktiven Methode, komme die Frage nach dem Abgrenzungskriterium auf, weil „die Gefahr eines Abgleitens der empirischen Wissenschaften in Metaphysik entsteht“ (ebd., S.9). Dem Kriterium zur Abgrenzung obliegt es, „die empirische Wissenschaft in zweckmäßiger Weise zu kennzeichnen“ (ebd., S.12), die in drei Forderungen besteht: Sie muss synthetisch (nicht widerspruchsvoll), nicht metaphysisch (erfahrbar) und ausgezeichnet (für uns erfahrbar) sein (vgl. ebd., S.13). Zur Überprüfung der Auszeichnung des Systems ist seine Überlegung der Falsifizierbarkeit geeignet, die mit Erfahrung (Empirie) arbeitet. Aus der methodischen Arbeitsweise mit der Erfahrung ergibt sich schließlich das Abgrenzungskriterium (vgl. ebd., S.14), welches sich nicht als Verifizierbarkeit, sondern als Falsifizierbarkeit darstellt:

*„Ein empirisch-wissenschaftliches System muß an der Erfahrung scheitern können“.* (Popper, 2002, S.15, Hervorhebung im Original)

Für eine wissenschaftliche Theorie bedeutet dies, dass sie grundsätzlich nicht bewiesen, sondern nur widerlegt werden kann. Durch Überprüfung der Theorie mit der Anwendung auf den speziellen Fall, muss sie ihre Gültigkeit zeigen. Das Kriterium der Überprüfbarkeit muss bereits bei der Konzeption der Theorie vorhanden sein, da sie ansonsten nicht den Anforderungen genügt. Sobald ein empirischer Nachweis erbracht wird, der der Theorie nicht entspricht, muss die Theorie somit verworfen werden. Obwohl kein Beweis für eine Theorie vorliegt, ist ihre wissenschaftliche Objektivität dennoch vorhanden und liegt darin, dass sie intersubjektiv nachprüfbar ist (vgl. ebd., S.18). Durch die enge Kopplung von Theorie und Experiment in der Wissenschaft, ist es möglich, Prüfbarkeit zu gewährleisten (vgl. ebd., S.19) und einer Theorie eine wissenschaftliche Existenzberechtigung zuzusprechen (sofern sie nicht falsifiziert wurde). Somit kristallisiert sich die empirische Methode als Element der Forschung heraus, in welcher das Kriterium der methodologischen Falsi-

fizierbarkeit die empirische Wissenschaft definiert (vgl. ebd., S.26). Aber auch das methodologische Vorgehen muss der Regel unterliegen, „[so]daß eine etwaige Falsifikation der in der Wissenschaft verwendeten Sätze nicht verhindert wird“ (ebd.).

Mit dem Abstecken des Spielraums von Erkenntnislogik und Methodenlehre schafft POPPER den Rahmen für die Ausführungen zur seiner 'Theorie der Erfahrung' (vgl. Popper, 2002, S.29). Man kann ganz grob sagen, dass sich eine Theorie solange hält, bis eine Prüfung das Gegenteil ergibt. POPPER macht die Erfahrung zu einem wichtigen Element seiner Wissenschaftstheorie, da er das Experiment als (wiederkehrenden) Prüfstein für die Theorie setzt. Hierbei ist besonders hervorzuheben, dass der Fokus auf der empirischen Wissenschaft liegt, die in dem gekoppelten Feld von Theorie, Experiment und Erkenntnis liegt. Das Theoriesystem dieser empirischen Wissenschaft darf, wie bereits von POPPER explizit erwähnt, nicht metaphysisch sein. In der Konzeption einer solchen Theorie muss dementsprechend die Möglichkeit bestehen, sie überprüfen zu können. Man kann damit sagen, dass innerhalb der Theorie nichts vorkommen darf, was sich der Erfahrungswelt entzieht.

Diese knappe Darstellung des wissenschaftlichen Konzepts von POPPER soll an dieser Stelle genügen, da im Folgenden auf seine Ausführungen zur Quantenmechanik eingegangen werden soll, die, unter Verweis auf spezielle tiefergehende Aspekte aus 'Logik der Forschung' (Popper, 2002), ein besonderes Licht auf die Messung der Quantenmechanik wirft.

## 5.2 Statistische Sichtweise der Messung

### 5.2.1 Quantenmechanik und Falsifizierbarkeit

In 'Logik der Forschung' geht POPPER im späteren Verlauf explizit auf die Quantenmechanik ein (vgl. Popper, 2002, IX. Kapitel 'Bemerkungen zur Quantenmechanik, S.167-197). Im Anschluss an die Ausführungen zur Wahrscheinlichkeit, soll die physikalische Theorie als Beispiel dienen, dass „dunkle Punkte der modernen Quantenphysik mit den Mitteln der logischen Analyse [aufgehellt werden können]“ (ebd., S.167).

POPPER beginnt seine Ausführungen der Quantenmechanik anhand von HEISENBERGS *Unschärferrelation*<sup>63</sup> und dessen Programm „die me-

---

<sup>63</sup>Bei POPPER auch als 'Unbestimmtheitsrelation' bezeichnet, wobei die Begriffe hier äquivalent verwendet werden.

taphysischen Bestandteile der Theorie [auszumerzen]“ (ebd., S.168). Im Speziellen bedeutet dies, dass HEISENBERG versucht hat, nichtbeobachtbaren Größen, wie bspw. die Elektronenbahnen, aus der Theorie zu entfernen - was ihm jedoch nur bedingt gelungen sei (vgl. ebd., S.169). Die Grundlage für die Annahme, die dazu führt, die Elektronenbahnen aus der Theorie zu entfernen, stammt aus seiner *Unschärferelation*:

„Jede physikalische Messung beruht auf einem Energieaustausch zwischen dem zu messenden Objekt und dem Meßapparat (eventuell dem Beobachter); das Objekt kann z.B. mit Licht angestrahlt und ein Teil der an ihm gestreuten Lichtmenge von dem Meßapparat absorbiert werden. Der Energieaustausch wird den Zustand des Objekts verändern, so daß dieser nach der Messung ein anderer sein wird als vorher. So lernt man durch die Messung eigentlich immer einen Zustand kennen, der durch den Messungsvorgang soeben zerstört wurde. [...] Man kann daher den Zustand eines atomaren Objekts *nach* der Messung aus dieser nicht erschließen, die Messung *nicht als Grundlage von Prognosen* verwenden.“ (Popper, 2002, S.169, Hervorhebung im Original)

Zwar ist es möglich, eine Messung so einzurichten, dass eine einzelne Größe von diesem Vorgang unbeeinflusst bleibt, dies aber zur Folge hat, dass eine andere Größe unscharf wird (vgl. ebd., S.169f.). Aus dieser Überlegung heraus entspringt die *Unschärferelation* von HEISENBERG mit der Unmöglichkeit der gleichzeitig genauen Messung von Ort und Geschwindigkeit. Wenn nun eine Ortsmessung vorgenommen wird, kann die Bewegungsrichtung<sup>64</sup> des Elektrons nicht bestimmt werden. Dies zieht zwei mögliche Deutungen nach sich (vgl. ebd., S.171): Entweder hat das Elektron keine Bahn, sondern nur einen genauen Ort und einen ungenauen Impuls (oder umgekehrt) - oder aber das Elektron besitzt einen genauen Ort und einen genauen Impuls, aber eine Messung lässt eines davon unscharf werden. Mit der letzteren Deutung spielt POPPER auf die Unvollständigkeit des Programms von HEISENBERG an (vgl. ebd., S.172), unbeobachtbare Größen aus der Theorie zu entfernen, da die Messung eine Größe unbeobachtbar bzw. unscharf macht.

---

<sup>64</sup>Anmerkung: Die Geschwindigkeit bzw. der Impuls wird in der Physik als vektorielle Größe angegeben, aus welchem die Richtung ersichtlich wird. Anschaulich lässt sich dies so beschreiben, dass das Elektron punktuell an einem Ort lokalisiert ist, an welcher sich der Ursprung eines Pfeils befindet, der in eine bestimmte Richtung zeigt.

POPPER versucht im Anschluss, dieses Dilemma von metaphysischen (unbeobachtbaren) Annahmen zu umgehen, indem er zunächst die Theorie streng statistisch deutet. Das umfasst zunächst die Quantenmechanik allgemein (vgl. ebd., S.172ff.), aber auch speziell die *Unschärferelation*, die ebenfalls statistisch umdeutet wird (vgl. ebd., S.174-178). Dieser Lesart nach „ist die Beschreibung eines einzelnen Teilchens durch ein Wellenpaket zweifellos als *formalistische Wahrscheinlichkeitsaussage* [aufzufassen]“ (ebd., S.174, Hervorhebung im Original). Unter der Annahme der korrekten Herleitung dieser Betrachtung, ist die Fokussierung auf die Wahrscheinlichkeit interessant, die sich für die *Unschärferelation* als statistische Streuungsrelation darstellt (vgl. ebd., S.175). Der Weg, den Popper an dieser Stelle zur Lösung der Metaphysikproblematik einschlägt, weist in die entgegengesetzte Richtung von HEISENBERGS Vorschlag: Die Bahn müsse Teil der Theorie sein, da die zu messenden Größen nicht metaphysisch seien (vgl. ebd., S.181):

„Diese Messungen und Bahnbestimmungen, die den in Heisenbergs Auffassungen überflüssigen Bestandteilen der Theorie genau entsprechen, sind nun in unserer Interpretation der Theorie nichts weniger als überflüssig: Sie dienen zwar nicht als Randbedingungen, als Grundlage zur Prognosendeduktion, aber sie sind unentbehrlich, wenn wir unsere Prognosen, nämlich unsere *Häufigkeitsprognosen*, überprüfen wollen: Die statistischen Streuungsrelationen behaupten ja, daß die Impulse bei Ortsausblendung streuen. Diese Prognose wäre nicht überprüfbar, nicht falsifizierbar, wenn wir nicht durch Experimente [...] imstande wären, [...] zu messen bzw. zu berechnen“. (Popper, 2002, S.180, Hervorhebung im Original)

Mit dem Hinweis auf die in der Einführung erwähnte Bedeutung der Messung erscheint das Anliegen POPPERS, den Bahnbegriff in die Theorie zu involvieren, als durchaus verständlich. Die Bahn eines bewegten Elektrons lässt sich durch die Angabe des Ortes und der Geschwindigkeit darstellen. Während HEISENBERG zu recht sagt, dass eine genaue Angabe von beiden Größen unmöglich ist und ihre gekoppelte Darstellung als Bahn unsinnig oder gar metaphysisch erscheint (vgl. ebd., S.171), möchte POPPER aus logischen Gründen nicht darauf verzichten, weil die Größen faktisch messbar sind. Er deutet somit das Teilchenbild, welches sich in

der *Unschärferelation* von HEISENBERG abzeichnet (vgl. ebd., S.172), als Wellenbild nach SCHRÖDINGERS *Wellenmechanik* um und verweist auf den statistischen Charakter der Quantenmechanik. Die Nachweisbarkeit der Teilchenbahn liegt somit in einem Rahmen der Wahrscheinlichkeit, was bedeutet, dass Teilchen zwar nicht genau auf einer bestimmten Bahn entlang laufen, diese aber mit einer bestimmten Häufigkeit beschriftet wird.<sup>65</sup>

Die konsequent logische Betrachtung des Wahrscheinlichkeitscharakters innerhalb der Quantenmechanik, die an der *Unschärferelation* deutlich wird, lässt sich auch auf andere Bereiche der Theorie erweitern. HEISENBERGS physikalisch-fachliche Ausführungen zur Messung machen deutlich, dass eine Bestimmung des Systems, in seinem unbeeinflussten Zustand, auf Ebene der Quantenmechanik nicht möglich ist. POPPER bestreitet dies zwar nicht, aber er verfolgt einen anderen Weg, nämlich die Notwendigkeit der Messbarkeit als Kriterium der Falsifizierbarkeit. Seine spezielle Auffassung der Messung verdeutlicht, dass sich die hieraus ergebende Problematik einer Messung, nämlich der Eingriff in das System, als unproblematisch herausstellt, da mit der Messung lediglich der statistische Charakter der Theorie überprüft wird. Ein Beispiel soll an dieser Stelle als helfende Erklärung die statistische Sichtweise verdeutlichen.

---

<sup>65</sup>Anmerkung: Ohne an dieser Stelle näher auf den Begriff der 'Wahrscheinlichkeit' bei POPPER einzugehen, sei hier erwähnt, dass es sich im Fall der Quantenmechanik um eine numerische Wahrscheinlichkeit handelt (vgl. Popper, 2002, S.107), die, objektiv interpretiert (vgl. ebd., S.109) und von ihm als Häufigkeitstheorie neu aufgebaut wird (vgl. ebd.). Im Rahmen von Wahrscheinlichkeitsaussagen in der Physik (vgl. ebd., S.152-158) lässt sich eine aufgestellte „formalistische Wahrscheinlichkeit in entsprechender Weise mit Hilfe des Begriffs der objektiven Wahrscheinlichkeit (relativen Häufigkeit) definieren“ (ebd., S.162).

### 5.2.2 Schrödingers Katze

In dem Artikel 'Die gegenwärtige Situation der Quantenmechanik' nimmt SCHRÖDINGER (Schrödinger, 1935a)<sup>66</sup> eine Beschreibung der Wellenfunktion vor und illustriert, an dem wohl bekanntesten Alltagsbeispiel aus der Quantenwelt, den Wahrscheinlichkeitscharakter, der in seiner Gleichung steckt.

In dem Gedankenexperiment, welches er am Ende des ersten Teils der dreiteiligen Schrift ersinnt, steht die Vorstellung, eine Katze mit einer „Höllmaschine“ in eine Stahlkammer einzusperren. Die Höllmaschine sei von einem Zugriff der Katze abgesichert. Im Inneren dieser Maschine solle nun ein statistischer (atomarer) Zerfallsprozess stattfinden: Falls er dies tue, setze er durch einen Mechanismus ein Gift frei, welches die Katze töte (vgl. ebd., S.812). Die Wellenfunktion, die den statistischen Charakter der Quantenmechanik offenbart, liefert nun folgendes:

„Die  $\psi$ -Funktion des ganzen Systems würde das so zum Ausdruck bringen, daß in ihr die lebende und die tote Katze (s. v. v.) zu gleichen Teilen gemischt oder verschmiert ist.“ (Schrödinger, 1935a, S.812)

Mit der Anwendung der Wellengleichung auf den vorliegenden Fall ergibt sich das quantenmechanische Messproblem insofern, als dass wir ohne Nachzusehen, ob der statistische Zerfall stattgefunden hat, auch nicht sagen können, ob die Katze nun tot oder noch lebendig ist. Die Gleichung beschreibt nämlich zunächst ganz allgemein das System statistisch, indem beide Szenarien möglich sind. Mit der Messung nimmt die Gleichung schließlich einen 100%-igen Wert an und liefert eine Antwort auf die Frage, ob die Katze nun lebt oder nicht. Im Zuge der Ausführungen zur Verwaschenheit der Variablen (vgl. ebd., S.811f.) lässt sich das Problem um *Schrödingers Katze* so darstellen, dass die Katze ohne eine Messung innerhalb dieser Höllmaschine sowohl tot als auch lebendig ist.

---

<sup>66</sup>Der Artikel wurde in der Zeitschrift 'Die Naturwissenschaften' gedruckt und auf drei Hefte aufgeteilt, die einzeln im Literaturverzeichnis aufgelistet sind (vgl. auch Schrödinger 1935b und c).

### 5.2.3 Blick auf das Messproblem

Eine Aussage über den Zustand von *Schrödingers Katze* lässt sich nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit angeben. Auf die Frage nach dem Zustand müsste man antworten, dass die Katze sowohl tot als auch lebendig ist.<sup>67</sup> Was in diesem Fall als Antwort vorgenommen werden soll bzw. erwartet wird, ist eine eindeutige Aussage und keine Wahrscheinlichkeitsangabe über den Zustand, in dem sich die Katze gerade befindet: tot oder lebendig. Ohne jedoch den aktuellen Zustand des Systems festzustellen (zu messen), ist eine solche Aussage unmöglich, da zu diesem Zeitpunkt beide Möglichkeiten offen stehen. An diesem Punkt scheint sich das quantenmechanische Messproblem zu offenbaren, sodass eine Aussage über das System nicht konkret getroffen werden kann, da es erst bei der Messung einen genauen Wert annimmt - und erst dann auf die Frage geantwortet werden kann, ob die Katze noch lebt. Die Messung ändert, durch den Eingriff in das System<sup>68</sup>, die vorliegende Wellenfunktion, sodass diese dann instantan einen klar definierten Wert annimmt - man könnte sogar denken, dass das Nachsehen die Katze erst tötet.

Mit Hilfe der statistischen Deutung, wie sie POPPER im Sinn hat, löst sich „das Problem der abrupten, diskontinuierlichen Änderung des Zustandes eines Quantenobjekts im Meßprozess [auf]“ (Düsberg, 2007, S.220). Unter Verweis auf „ein von Einstein angegebenes Gedankenexperiment“ (Popper, 2002, S.184) erübrigt sich mit der statistischen Sichtweise das Problem mit dem Kollaps:

„Es seien ja gar nicht *dieselben* Wahrscheinlichkeiten, die durch die Messung plötzlich andere Werte bekommen, sondern es seien *verschiedene* Wahrscheinlichkeiten, die - was nicht wundern könne - verschiedene Werte haben [...].“ (Düsberg, 2007, S.220, Hervorhebung im Original)

In unserem übertragenen Fall bedeutet dies, dass die Katze (ohne Messung) zunächst sowohl eine Wahrscheinlichkeit besitzt, lebendig, aber auch eine Wahrscheinlichkeit, tot zu sein. Sie befindet sich in einem Zu-

---

<sup>67</sup>Sie ist zwar, wie wir wissen, tot oder lebendig; nach der Statistik her jedoch auch in einem Zustand, der beides vereint („verwischt“). Um die Aussage einer Zombiekatze zu umgehen, könnte man die Antwort auch zurückweisen, indem man sagt, dass keine konkrete Aussage getroffen werden kann, ohne vorher nachgesehen zu haben.

<sup>68</sup>So die Interpretation des Vorgangs durch die *Kopenhagener Deutung* beim ‚Kollaps der Wellenfunktion‘.

stand, der beide Möglichkeiten vereint. Nach der Messung, also nachdem wir nachgesehen haben, ob die Katze nun lebendig oder tot ist, ist bei dem System eine andere Wahrscheinlichkeit vorzufinden. Nun lässt sich klar entscheiden, welchen Zustand die Katze besitzt. Dies sind die Wahrscheinlichkeiten nach der Messung.

„Damit löse sich das Problem der sprunghaften Zustandsänderung im Meßprozess auf: es gehe in Wahrheit um eine „fast trivial(e)“ [...] Beziehung zwischen Wahrscheinlichkeiten [...].“ (Düsterberg, 2007, S.220, Hervorhebung im Original)

Durch die strikte Betrachtung der Wahrscheinlichkeiten zu einem speziellen Zeitpunkt und einer rein statistischen Sichtweise lässt sich resümieren, dass der Eingriff in das System durch die Messung nicht die Wellenfunktion ändert, sondern lediglich die vorliegende Wahrscheinlichkeit festgestellt wird. *Schrödingers Katze* wird demnach nicht durch die Messung am System getötet, sondern durch das Nachsehen wird nur der aktuelle Zustand gemessen, der sich nach der statistischen Theorie der Quantenmechanik ergibt. Als überprüfendes Element stellt die Messung somit kein Problem dar, weil sie lediglich dazu dient, eine aktuelle Wahrscheinlichkeit zu überprüfen. Demnach funktioniert POPPERs Quantenmechanik auch ohne Beobachter, da dieser nur da ist, um nachzusehen, was aktuell der Fall ist, sich die Natur aber auch ohne Einfluss der Messung vollzieht.

### 5.3 Physik ohne Beobachtung

In den Ausführungen zur Physik plädiert POPPER weiterhin dafür, wie in seinen wissenschafts- und erkenntnistheoretischen Ausführungen eingeführt, dass dem Experimentator bzw. dem Beobachter weiterhin die Rolle zukommt, Theorien zu prüfen (vgl. Popper, 2001, S.42). Diese Vorstellung steht konträr zur Vorstellung, die sich innerhalb der *Kopenhagener Deutung* zur Quantenmechanik entwickelt hat, die die Meinung vertritt, dass die Theorie unsere Beobachtungen darstellt (vgl. ebd., S.42f.). Dem entgegen vertritt POPPER die Auffassung, dass es eine Quantenmechanik und auch Realität ohne einen Beobachter gibt.

In der Diskussion um die Gültigkeit der *Kopenhagener Deutung*, hat sich die Kernfrage, zwischen BOHR und EINSTEIN, dahingehend entwickelt, „ob die Quantenmechanik ›vollständig‹ sei. Einstein sagte nein. Bohr sagte ja“ (ebd., S.46, Hervorhebung im Original). POPPER schließt sich der Position EINSTEINS an (vgl. ebd.) und weist auf das Element der Messung - bzw. den eingreifenden Beobachter - hin, was innerhalb der *Kopenhagener Deutung* zu Problemen führt. Die Unvollständigkeit des mathematischen Formalismus rühre nämlich von der Einführung des Beobachters in die Theorie her (vgl. ebd., S.140ff.), was sich innerhalb einer Messung darin äußere, dass der Formalismus der *Schrödingergleichung* zweimalig angewendet werden müsse:<sup>69</sup>

„Zwei Anwendungen des Formalismus sind nötig, und um die Gleichung ein zweites Mal anzuwenden, scheint eine *Beobachtung* notwendig zu sein.“ (Popper, 2001, S.141, Hervorhebung im Original)

Praktisch bedeute dies, nach HEISENBERG, dass die Wellenfunktion in dem Augenblick der Messung kollabiert und „der Übergang vom Möglichen zum Faktischen vollzogen wird“ (ebd., S.142)<sup>70</sup>. Die Unvollständigkeit des Formalismus bestehe nun darin, dass die Anwendung des Formalismus als Schritt, der aus der Theorie nicht ableitbar sei, nicht notwendig sein dürfe, um von einer vollständigen Theorie zu sprechen (vgl. ebd.). Dies sei zwar keine gravierende Schwierigkeit, weise jedoch auf die Unvollständigkeit der interpretierten Theorie hin (vgl. ebd., S.143), deren Probleme durch eine andere Sichtweise ausgeschaltet werden könne.

Das Postskript zu 'Logik der Forschung' (Popper, 2002) beinhaltet verschiedene Änderungen von POPPER an seinem Werk, um es in ein kritikfreieres Licht zu rücken und die Ausführungen in 'Die Quantentheorie und das Schisma der Physik' (Popper, 2001) kohärenter darzustellen. Während so die Häufigkeitsinterpretation aus 'Logik der Forschung' die vorgeschlagene Sichtweise auf die Quantenmechanik ist, soll diese nun durch die Propensitätsinterpretation ersetzt werden (vgl. ebd., S.115), die als eine physikalische Eigenschaft verstanden werden kann (vgl. ebd., S.83).<sup>71</sup> Mit der Zuschreibung einer solchen Verwirklichungstendenz, der

<sup>69</sup>Vgl. hierzu Kap. 4.2.2 auf Seite 28.

<sup>70</sup>Vgl. auch hierzu den exakten Wortlaut bei HEISENBERG (1979, S.56).

<sup>71</sup>Anmerkung: POPPER differenziert in diesem Kontext auch die Begriffe der Wahrscheinlichkeitsaussage und der statistischen Aussage. Erstere würde die virtuelle, zweite die wirkliche Häufigkeit beschreiben (vgl. Popper, 2001, S.83).

Propensität, lässt sich der 'Kollaps der Wellenfunktion', der sich als quantenmechanisches Messproblem darstellt, insofern umgehen, dass er von der statistischen Sichtweise heraus unproblematisch ist. Der grundlegende Gedanke aus 'Logik der Forschung' (Popper, 2002) bleibt hiervon unberührt, dass es nämlich auf einen logisch angemessenen Blick auf die Wahrscheinlichkeit ankommt und deren Änderung beim Kollaps kein Übergang des Formalismus darstellt, sondern als zwei unterschiedliche Wahrscheinlichkeiten zu interpretieren ist. Mit einer abstrakten Überlegung lässt sich dies verdeutlichen: Das Ereignis A tritt, ebenso wie das Ereignis B, mit einer Wahrscheinlichkeit zu 50% ein (vgl. Popper, 2001, S.88f.). Mit der Messung würde, nach der *Kopenhagener Deutung*, die Wellenfunktion im Augenblick der Messung kollabieren, da nun das Mögliche zum Faktischen (s.o.) geworden ist, also eins der beiden Ergebnisse gemessen wurde, mit 100%. Nach Ansicht POPPERS ist dies eine nicht korrekte Sichtweise, da die gemessene Wahrscheinlichkeit keine „veränderte[...] Form des ursprünglichen Wellenpaketes [ist]“ (ebd., S.89), sondern eine neue Wahrscheinlichkeit darstellt:

„Solange wir das Ergebnis des [Münz-]Wurfes nicht nachschauen, *können* wir noch sagen, daß die Wahrscheinlichkeit  $\frac{1}{2}$  sein wird. Wenn wir uns jetzt herunterbeugen und nachschauen, gibt es plötzlich eine ›Änderung‹: die eine Wahrscheinlichkeit wird *1*, die andere *0*. [...] Hier oder an *jeder* Reduktion des Wellenpakets ist nicht mehr beteiligt als das triviale Prinzip: wenn unsere Information das Ergebnis des Experiments enthält, dann wird die Wahrscheinlichkeit dieses Ergebnisses *bezogen auf diese Information* [...] immer [100% sein]“. (Popper, 2001, S.91, Hervorhebung im Original)

Was er hiermit klar zum Ausdruck bringt ist, dass die Wahrscheinlichkeiten vor und nach der Messung sich nicht auf das gleiche System beziehen und die Messung keinerlei Einfluss auf den 'Kollaps der Wellenfunktion' bedeutet, der auch ohne Beobachter stattgefunden hätte. Denn „[o]b wir über das Ereignis [...] ›informiert‹ sind oder nicht, ist irrelevant“ (ebd., S.102, Hervorhebung im Original). Die physikalische Welt selbst ändert sich und somit auch die Wahrscheinlichkeit, die sich im 'Kollaps der Wellenfunktion' ausdrückt.

Dieser Sichtweise entspringt POPPERs Überzeugung, dass sich die Quantenmechanik auch ohne Beobachter vollzieht. Im Postskript sagt POPPER mit Nachdruck, dass die Quantenmechanik eine statistisch zu interpretierende Theorie ist. Für das quantenmechanische Messproblem löst sich die Problematik insofern, dass die Wahrscheinlichkeiten betrachtet werden und die Schwierigkeit bei der Messung, die POPPER innerhalb der *Kopenhagener Deutung* lokalisiert, eigentlich keine ist. Ob nun diese Auffassung der Quantenmechanik die Richtige ist, sei dahingestellt. Sie eröffnet jedoch insofern die praktische Möglichkeit, dass eine Messung nicht mehr problematisch erscheint, weil die Messung als Kriterium der Falsifizierbarkeit dient und eine Trennung zwischen Subjekt und Objekt gemacht wird. Somit wendet sich POPPER gegen die Position von HEISENBERG, der im Zuge der Quantenmechanik zu dem Schluss gekommen sei, dass es keine objektive Realität geben könne (vgl. ebd., S.12).

Mit dem vorgestellten Konzept der Forschung, in welchem die Messung die physikalischen Vorgänge nicht beeinflusst, versucht POPPER den Subjektivismus aus der Physik zurückzutreiben (vgl. ebd., S.4-8). Das Thema des Buches 'Die Quantentheorie und das Schisma der Physik' sei nämlich der Realismus (vgl. ebd., S.4), dem er versucht (und dessen Anhänger er sei vgl. ebd., S.31) eine Stimme zu verleihen. Die Trennung innerhalb der Physik, die er in diesem Werk zeigen möchte, findet nämlich an der Stelle zwischen dem Realismus und dem Instrumentalismus statt (vgl. ebd., S.120) und der Fokus ist die Existenz der Welt unabhängig von dem Beobachter:

„...die Tatsache, daß diese Welt unabhängig von uns existiert; daß sie existierte, bevor es Leben gab, so wie unsere besten Hypothesen das besagen; und daß sie, nach allem, was wir wissen, weiterexistieren wird, und zwar noch lange, nachdem wir alle längst wieder verschwunden sind.“ (Popper, 2001, S.4)

Mit dem Blick auf diese starke Bekundung gegenüber der Realität, wird das vorgestellte wissenschaftliche Konzept von POPPER noch nachvollziehbarer: Die Außenwelt existiert und wir stellen in unserem Leben Theorien über sie auf, die wir versuchen anhand unserer Erfahrung zu prüfen, um zu einem angemessenen Bild von ihr zu kommen. Sofern eine Theorie falsifiziert wird, muss sich eine andere neue und bessere Theorie an unserer Erfahrung messen. Es ist somit unumgänglich, dass wir mit

unserer Außenwelt interagieren - und dies stellt im Grunde auch kein Problem dar. Den Einfluss einer Messung auf unsere Theorie, sodass diese zum Problem werden könnte, liegt nicht an unserem Eingriff. Das Problem liegt an den von uns falsch interpretierten Stellen der Theorie - und unserer Sichtweise auf die Vorgänge, die sich daraus ableiten lassen. Eine Fokussierung auf die Sichtweise ist auch im Bereich der Erkenntnistheorie einzuordnen, die sich bei POPPER schon an der Grundannahme des Realismus zeigt. Der Realismus wird nachfolgend Thema sein, da eine spezielle Position zur Erkenntnis grundlegende Missverständnisse verhindern kann - oder uns im Zuge von wissenschaftlichen Problemen dazu verleiten kann, unsere Vorstellung von ihr zu überdenken.

## 6 Problem

### 6.1 Realismus der Naturwissenschaften

Die Entfaltung der Erkenntnistheorie fängt im Bereich der empirischen Wissenschaften mit der Wahrnehmung an, die Teil der naturwissenschaftlichen Arbeit darstellt, weil sie „die grundlegendste Form zu sein [scheint], in der wir und andere Tiere Information über die externe Welt gewinnen können“ (Detel, 2007, S.13). Mit der Reflexion über die Wahrnehmung ergeben sich verschiedene Sichtweisen im Bezug auf die Erkenntnis und das Weltbild. Im wissenschaftlichen Bereich hat sich der Realismus zu einer gängigen Sichtweise entwickelt, wobei er „eher eine Einstellung als eine deutlich ausformulierte Doktrin [ist]“ (Hacking, 1996, S.51). Grundsätzlich beschreibt der Realismus, „daß die von richtigen Theorien beschriebenen Gegenstände, Zustände und Vorgänge wirklich existieren“ (ebd., S.43). Mit dieser Formulierung wird das klassische Begriffspaar von 'Theorie und Empirie' nun allgemein so beschrieben, dass es eine wissenschaftliche Theorie von Seiten des Wissenschaftlers gibt (die wahr oder falsch sein kann) und die Außenwelt in ihren mannigfaltigen Formen.

Unter der Annahme, dass der Wissenschaftler versucht, Objekte der Außenwelt wahrzunehmen, ergeben sich einige Differenzierungen hinsichtlich der realistischen Sichtweise, wobei jedoch erstens die Gegenstände der Wahrnehmung die wahrgenommenen Gegenstände selbst sind und zweitens diese Gegenstände mit ihren Eigenschaften unabhängig von unserer Wahrnehmung existieren (vgl. Detel, 2007, S.17). Im Bezug auf die Naturwissenschaften - und im speziellen Fall die Quantenmechanik - muss hier jedoch von einem indirekten Realismus gesprochen werden (vgl. ebd., S.17), weil die wahrgenommenen Gegenstände vermittelt werden - wie im Falle JÖNSSONS der Ort des Elektrons durch die Färbung der Fotoplatte. Bei HACKING lässt sich diese Darstellung im Hinblick auf den wissenschaftlichen Realismus weiter differenzieren, als dass er hier von einem Entitäten-Realismus sprechen würde, der „besagt, daß eine Vielzahl theoretischer Entitäten wirklich existiert“ (Hacking, 1996, S.54). So auch das indirekt wahrgenommene Elektron auf der Fotoplatte, welches innerhalb der Physik eine theoretische Entität darstellt. Zwar ist diese allgemeine Beschreibung mit Umwegen verbunden, da es auch antirealistische Vorstellungen zum Elektron gibt (vgl. ebd., S.53), die HACKING jedoch nicht überzeugen, da dieser Position vertritt: „*Wenn man sie verspüren kann, sind sie real*“ (ebd., S.47, Hervorhebung im Original).

Ein aktuell diskutierter Vorschlag im erkenntnistheoretischen Bereich des naturwissenschaftlichen Realismus stammt von HOLGER LYRE mit dem Strukturenrealismus. Durch ihn ist es möglich, auf eine modifizierte Art an den klassischen Realismus anzuknüpfen und ihn aufrecht zu erhalten. LYRE bemerkt (vgl. Lyre, 2006, S.32), dass die dem Strukturrealismus entsprungene Überlegung auf HENRI POINCARÉ zurückgeht, der auf die Theoriebildung in den Naturwissenschaften hinweist. In Theorien werden seit jeher Begriffe und Bezeichnungen verwendet, doch „Benennungen waren nichts als Bilder, die wir an die Stelle der wirklichen Objekte gesetzt haben, und diese wirklichen Objekte wird die Natur uns ewig verbergen; die wahren Beziehungen zwischen diesen wirklichen Objekten sind das einzig Tatsächliche, welches wir erreichen können“ (Poincaré, 1904, S.162). Mit Verweisen auf verschiedenste Autoren der Philosophie beschreibt LYRE die Entwicklung des klassischen Strukturrealismus (vgl. Lyre, 2006, S.32ff.)<sup>72</sup>, der in diesem Sinne keinen neuen Vorschlag darstellt. Jedoch ist vor einiger Zeit eine neue Debatte entbrannt - und der Strukturenrealismus kann als „Interpretation der Physik“ (Lyre, 2012, S.368) herangezogen werden, da physikalische Theorien, wie beispielsweise die Quantenmechanik, viele der hier angesprochenen Strukturen enthalten würden (vgl. ebd., Ausführungen S.368-379).

An der Schnittstelle zwischen Wissenschafts- und Erkenntnistheorie angesiedelt, lässt sich mit dem Strukturenrealismus auf die Erkenntnis durch Erfahrung und Theorie verweisen. Die mögliche Erkenntnis von Objekten<sup>73</sup> ist demnach auf ein Erkennen struktureller Relationen zwischen verschiedenen Objekten beschränkt.

---

<sup>72</sup>Anmerkung: Für den Übertrag des Strukturrealismus auf die Physik sei erwähnt, dass LYRES Habilitationsschrift als „strukturealistische Analyse der modernen Physik“ (Lyre, 2006, S.36) gekennzeichnet ist und diese den Sachverhalt umfangreich darstellt.

<sup>73</sup>PETER M. AINSWORTH entscheidet sich bei der Analyse des Strukturbegriffes für die Sichtweise nach MICHAEL ESFELD und VINCENT LAM, die im Folgenden ebenfalls verwendet wird: „Our position is to regard structure as the concrete relations that obtain between physical objects“ (Esfeld/Lam, 2008, S.28).

## 6.2 Vorstellung und Wirklichkeit

### 6.2.1 Moderater ontischer Strukturenrealismus

LYRE beschreibt den grundlegenden Gedanken, um den strukturellen Realismus in seinen verschiedenen Varianten, wie folgt:

„Die Bezeichnung Strukturenrealismus (SR) fasst ein ganzes Bündel von Auffassungen zusammen, die sich der These verpflichten, dass unser Wissen über die theoretisch behaupteten Entitäten im Rahmen wissenschaftlicher Theoriebildung vorzugsweise oder ausschließlich struktureller und nicht gegenständlicher Natur ist.“  
(Lyre, 2006, S.32)

Anknüpfend an die konträren Positionen zwischen Realismus und Antirealismus lässt sich feststellen, dass sich innerhalb des Strukturenrealismus die Debatte weg von den theoretisch behaupteten Entitäten hin zu den übergeordneten strukturellen Merkmalen verlagert (vgl. Ladyman, 2014, Kap. 2, Abschn. 16/18)<sup>74</sup>. Es scheint, dass der Strukturenrealismus die bestmögliche Kombination zwischen Realismus und Antirealismus darstellt und beide Ansichten mit einander vereint.<sup>75</sup> Grundsätzlich ist er somit als eine „Variante des wissenschaftlichen Realismus ansehbar“ (vgl. Lyre, 2006, S.32), der Strukturen als wesentliche Erkenntnis der Natur herausstellt und nicht der ihm zugeschriebenen theoretischen Entitäten.

Ein Problem, mit welchem der Strukturrealismus noch zu kämpfen hat, „besteht [beispielsweise] in der Frage, wie Relationen ohne Relata instanzierbar sein können“ (ebd., S.36). Ferner existiert der Einwand, dass er nur auf mathematische Wissenschaften anwendbar sei (vgl. ebd.), was sich deutlich an den formalistischen Ausführungen über weitere verschiedene Varianten des ontischen Strukturrealismus zeigt (vgl. Ainsworth, 2010, S.53f.). Die starke mathematische Komponente, die im Bereich der Physik sehr abstrakt und unverständlich werden kann, zeigt sich in dem

---

<sup>74</sup>Die Zitation der 'Stanford Encyclopedia of Philosophy' bezieht sich zunächst auf die Kapitelnummerierung und als genaue Lokalisierung auf den Abschnitt des Kapitels. Dabei seien die Abschnitte durch die Zeilenumbrüche, die auf der ersten Ebene liegen (hier werden eingerückte Absätze, wie Aufzählungen oder Zitate nicht mitgerechnet) und durch aufgezählten Unterpunkte nummeriert.

<sup>75</sup>Um diesen Punkt haben sich verschiedene Argumente versammelt, die für und wider diese These sprechen und im einzelnen nicht dargestellt werden soll (vgl. hierzu Ladyman, 2014, Kap. 2).

Umstand, dass physikalische Phänomene durch mathematische Beschreibungen möglich sind und sich diese nicht unterscheiden lassen (vgl. ebd., S.50f.).

Grundsätzlich fokussiert der Strukturenrealismus auf die Zusammenhänge innerhalb der Natur und behauptet von ihnen eine Darstellung der Realität. „Strukturen sind abstrakt deklariert als Mengen von Relationen, die Mengen von Objekten aufgeprägt sind“ (Lyre, 2012, S.380) und erkennen lassen sich (bzw. existieren würden) nur Beziehungen zwischen den einzelnen Bezugspunkten. Die neue Debatte um den Strukturenrealismus ist von der Unterscheidung zwischen verschiedenen Varianten geprägt, die den sogenannten epistemischen (ESR) und den ontologischen Strukturenrealismus (OSR) umfassen:

„A crude statement of ESR is the claim that all we know is the structure of the relations between things and not the things themselves, and a corresponding crude statement of OSR is the claim that there are no 'things' and that structure is all there is [...].“  
(Ladyman, 2014, Kap. 4.0, Abschn. 2/34)

Der Unterschied beider Positionen zeigt sich in der Differenzierung zwischen 'erkennbarer' und 'existierender' Natur. Der ESR betrachtet nur das als real, was uns wissenschaftliche Theorien über Relationen zwischen unbeobachtbare Objekte sagen (vgl. Ladyman, 2014, Kap. 3.0, Abschn. 1/3): Das einzig *erkennbare* der Natur sind die strukturellen Relationen. Während der beliebtere OSR<sup>76</sup> andererseits davon ausgeht, dass nur die Relationen existieren<sup>77</sup>: Das einzig *existierende* der Natur sind die strukturellen Relationen.

Ein gewisses Problem, welches im Kontext der ontischen Variante entsteht, ist der reine Fokus auf die strukturellen Relationen zwischen Entitäten (s.o.). Es wird nur die Struktur als existent angesehen, weshalb sich die Frage nach den dahinter stehenden Entitäten aufdrängt.

---

<sup>76</sup>Anmerkung: „OSR has attracted most sympathy among some philosophers of physics and physicists.“ (Ladyman, 2014, Kap. 4.0, Abschn. 3/34)

<sup>77</sup>Aufgrund der Textdichte des Artikels aus der 'Stanford Encyclopedia of Philosophy' sei auf weitere Differenzierungen innerhalb der einzelnen Varianten hingewiesen, die sich in speziellen Ausführungen unterscheiden, hier jedoch verallgemeinert wurden.

„Ontic structural realists argue that what we have learned from contemporary physics is that the nature of space, time and matter are not compatible with standard metaphysical views about the ontological relationship between individuals, intrinsic properties and relations. On the broadest construal OSR is any form of structural realism based on an ontological or metaphysical thesis that inflates the ontological priority of structure and relations.“ (Ladyman, 2014, Kap. 4.0, Abschn. 5/34)

In dieser Hinsicht haben sich um die metaphysischen Überlegungen des OSR verschiedene Möglichkeiten herausgebildet. Sie behandeln das Verhältnis von der Struktur (Relation) und den individuellen Objekten (Relata), die diese hervorbringen. An dieser Stelle sei eine der Möglichkeiten näher ausgeführt.

ESFELD ist ein Vertreter des moderaten ontischen Strukturrealismus, welcher grundsätzlich die Relation zwischen einzelnen Relata als existent ansieht. Die Grundannahme, dass wir uns nur auf wahrgenommene Relationen beziehen, ist bei ihm dennoch mit der Möglichkeit einer Existenz der Natur verknüpft:

„Wenn es Relationen gibt, gibt es selbstverständlich auch Objekte als dasjenige, was in den betreffenden Relationen steht; aber die Relationen - statt intrinsischer Eigenschaften, welche eine intrinsische Identität bereitstellen - sind die Weisen (Modi) wie die Objekte existieren.“ (Esfeld, 2012b, S.94)

Innerhalb dieser Variante weist ESFELD die Annahme zurück, dass es keine Relata gibt (vgl. Ladyman, 2014, Kap. 4.0, Teil 4). Darüber hinaus weist er auch zurück, dass diese Relata intrinsische Eigenschaften besitzen (vgl. ebd.), sondern lediglich in den Relationen untereinander Varianten und Möglichkeiten darstellen, wie die einzelnen Relata existieren. Für den Vorschlag, Relata eine Existenz zuzuschreiben, gibt es ein einfaches Argument:<sup>78</sup>

---

<sup>78</sup>Anmerkung: AINSWORTH trägt zwei Argumente vor, die von ESFELD, in Kooperation mit LAM, verfasst wurden. Als Akzentuierung für den späteren Verlauf sei auf eines der Argumente hingewiesen (vgl. Ainsworth, 2010, S.54f.).

„[I]f there is more in our metaphysics than is required for it to cohere with our epistemology then we should trim off the excess [...] while we have knowledge of objects and the relations they stand in, we have no knowledge of properties.“ (Ainsworth, 2010, S.54)

Mit der Konzeption eines Bildes der Realität, besagt die Variante des moderaten ontischen Strukturrealismus, dass Objekte und die Beziehungen zwischen den einzelnen Objekten existieren. Allerdings ist eine direkte Wahrnehmung der Objekte nicht möglich, sondern nur ihre Relation zu anderen Objekten. Das hieraus erkennbare strukturelle Verhalten der einzelnen Objekte rührt aber nicht von den intrinsischen Eigenschaften der individuellen Objekte her, sondern von verschiedenen Weisen, wie diese sich darstellen.

Wie diese Überlegungen im Hinblick auf die Physik anzuwenden sind, soll nun am Beispiel der geschichtlichen Vorstellungsentwicklung des Elektrons deutlich werden, da „eine zunehmende strukturelle Betrachtungs- und Verständnisweise eine kaum zu leugnende Tatsache darstellt - und [...] vielversprechende Optionen [bietet]“ (Lyre, 2006, S.36).

### 6.2.2 Theorie des Elektrons

Ende des 19. Jahrhunderts nimmt das Elektron, vor allem im Bereich der entstehenden Quantentheorie (v.a. bei der Spektralanalyse), eine besondere Stellung ein. Der *Welle-Teilchen-Dualismus* für das Elektron, der sich im Rahmen des Doppelspaltversuchs von JÖNSSON zeigt, gründet auf der Überlegung von DE BROGLIE, Teilchen nun auch Welleneigenschaften zuzuschreiben.

In seiner historischen Beschreibung über die Entdeckung des Elektrons im 19. Jahrhundert setzt JOST LEMMERICH den Anfang der Entwicklung um das Elektron in das Jahr 1833, in welchem MICHAEL FARADAY über die Elektrolyse<sup>79</sup> schreibt, dass man nicht von der Hand weisen kann, dass sich die Idee eines (elektrischen) Partikels aufdrängt (vgl. Lemmerich, 1998, S.617). Jedoch lässt er völlig offen, was Elektrizität ist - stattdessen habe er lediglich das regelhafte Verhalten beschrieben (vgl. ebd.). 1881 stellt HERMANN L. F. VON HELMHOLTZ der Royal Society seine Überlegungen vor, dass sich Elektrizität - positive wie negative - in

---

<sup>79</sup>Anmerkung: Ein chemischer Prozess zur Erzeugung elektrischen Stroms.

elementare Bestandteile aufteilen lassen, die sich wie elektrische Atome verhalten (vgl. ebd.). Zur gleichen Zeit prägte GEORGE J. STONEY den Begriff des Elektrons, der diese Bezeichnung als Erster verwendet; allerdings bleibt immernoch offen, ob Elektronen nun wirklich Teilchen sind (vgl. ebd.).

Mit der technischen Verwirklichung von Kathodenstrahlen<sup>80</sup> schloss WILLIAM CROOKES 1878 aus seinen Experimenten, dass diese Strahlen Partikel sind (vgl. ebd., S.619), wohingegen HEINRICH HERTZ der Meinung war, dass sich Kathodenstrahlen wie Teilchen verhalten (ebd.). Mit weiteren experimentellen Möglichkeiten hat THOMAS EDISON der Elektrizität die Bewegung von Negativität zugeschrieben (vgl. ebd., S.620), was auf Materie hindeutet. Die experimentelle Bestätigung ist 1890 durch ARTHUR SCHUSTER gekommen (vgl. ebd., S.620f.), der Gasmoleküle in positive und negative Bestandteile zerlegt und die Elektrizität durch Bewegung des negativen Teils nachgewiesen hat, woraus er ebenfalls auf Teilchen schloss (vgl. ebd., S.621). PHILIP LENARD, ein Schüler und Mitarbeiter von HERTZ, schloss, aufgrund seiner Experimente, auf das Gegenteil: Wellen (ebd.).

Mit der Entdeckung der Röntgenstrahlung von WILHELM C. RÖNTGEN im Jahr 1895, war es JOSEPH J. THOMSON möglich, die Bewegung negativer Elektrizität in den Kathodenstrahlen nachzuweisen und die Bewegungsenergie der Teilchen zu bestimmen - wobei diese nach wie vor nicht als Elektronen bezeichnet wurden (vgl. ebd., S.621f.). Erst weitere Arbeiten von THOMSON haben die Teilchenvorstellung<sup>81</sup> weiter geprägt, die die negative Ladung tragen - bis dahin, dass die Vorstellung von Elektronen als Teilchen 1899 endgültig gefestigt war (vgl. ebd., S.623).

Auf Grundlage der Vorstellungen zum Elektron, verfasste THOMSON 1903 sein nach ihm benanntes Atommodell<sup>82</sup>. Über die Kathodenstrahlen, die „aus negativ geladenen Teilchen bestanden; [fand] die genaue Bestimmung [...] 1897 statt“ (Hund, 1984, S.33) - das Elektron wurde zu Beginn der Quantentheorie in der Vorstellung der Physiker zu einem Teilchen. Die starke Prägung der Teilchenvorstellung des Elektrons zeigt sich auch an den folgenden Atommodellen von RUTHERFORD und BOHR, sowie an der experimentellen Nutzung. Die einfache Handhabung

---

<sup>80</sup>Anmerkung: Als Kathodenstrahlen werden Elektronen bezeichnet, die sich strahlenförmig zwischen zwei Kondensatorplatten bewegen (vgl. Tipler/Mosca, 2006, S.834).

<sup>81</sup>Anmerkung: Im Original sind es Korpuskel (vgl. Lemmerich, 1998, S.623); der Begriff des Teilchens ist hier äquivalent zu verstehen.

<sup>82</sup>Vgl. hierzu 1.2 auf Seite 3.

der Elektronen war möglich, da es nun bspw. die technische Möglichkeit des Kathodenstrahls gab, um mit Elektronen zu arbeiten (s.o.). Ferner war eine Beschreibung von theoretischer Seite, durch die Berechnung der klassischen Bewegungsenergie, möglich und lieferte fruchtbaren Boden für die Teilchenvorstellung. Das Elektron war nun ein negatives Elektrizitätsteilchen (vgl. Hund, 1984, S.58f.), dessen weitere Eigenschaften im Versuch von ROBERT A. MILLIKAN, im Versuch zur Mindestladung im Jahre 1908, genauer bestimmt wurde (vgl. Hacking, 1996, S.45). Die Teilchenvorstellung war so lange vorherrschend, bis die Hypothese des *Welle-Teilchen-Dualismus* die Vorstellung um das Elektron wieder umkehrte und nun auch die anfänglich vermuteten Welleneigenschaften involvierte. LEMMERICH pointiert das Ende der Ausführungen über die Entwicklung des Elektrons sehr passend: „It is also interesting to note, that even 100 years later the question of what an electron is has not finally been answered“ (Lemmerich, 1998, S.625).

Die dualistische Natur des Elektrons war nun fester Bestandteil der Quantenmechanik. Doch währenddessen gab es weitere Modifikationen um die Vorstellung des Elektrons, die sich von den 1930er Jahren bis in die Neuzeit der 1960er Jahre erstreckten (vgl. Bain/Norton, 2001, S.451f.). Jedoch musste jede bisherige Theorie, die es von dem Elektron gegeben hat, umgeschrieben werden (vgl. ebd., S.452) und die wahre Natur ist noch nicht entdeckt worden: „Physicists are fallible and their evidential base never complete, so that we cannot expect any theory to be error-free or final“ (ebd., S.461).

### 6.2.3 Elektron im Strukturenrealismus

Eine strukturenrealistische Sichtweise kann Licht in das Dunkel um den *Welle-Teilchen-Dualismus* bringen, indem die Vorstellung zum Elektron in JÖNSSONS Doppelspaltversuch thematisiert wird. Wie in den Aspekten der Quantentheorie herausgestellt, war Mitte der 1920er Jahre die Vorstellung einer dualistischen Natur um die theoretische Entität des Elektrons vorherrschend. In den Ausführungen zum Doppelspalt ist deutlich hervorgetreten, dass das Elektron, auf einen klar auszumachenden Ort auf der Fotoplatte trifft und es als Teilchen anzusehen ist. Anhand des gemessenen Musters zeigt sich jedoch, dass sich die Interferenzverteilung der einzelnen Elektronen durch die Annahme einer Welle erklären lässt. Was ist das Elektron nun?

„Scientific realism is the view that we ought to believe in the unobservable entities posited by our most successful scientific theories.“  
(Ladyman, 2014, Kap. 1, Abschn. 1/5)

Dem Elektron als theoretische Entität, welche nicht direkt zu beobachten ist, werden in der Quantenmechanik nun zwei unterschiedliche (und aus klassischer Sicht konträre) Eigenschaften zugesprochen, was durchaus schwierig vorzustellen ist und zwischen den einzelnen Interpretationen der Theorie ebenfalls zur Verwirrung beigetragen hat. Eine klassische Einteilung in Teilchen oder Welle ist nicht mehr möglich und die Frage danach, was das Elektron nun ist, umso schwieriger. Dieses Verständnisproblem im Bezug auf das Objekt 'Elektron' resultiert aus der Schnittstelle zwischen Wissenschafts- und Erkenntnistheorie, da die Theorie des Elektrons an die Grenzen entitärer Vorstellung im Sinne der klassischen Physik stößt.

Die Beschreibung der natürlichen Vorgänge durch die Quantenmechanik zeigt, wie im Falle von JÖNSSONS Doppelspaltversuch, eindeutige Anwendungsmöglichkeiten und deutet ebenfalls auf den erfolgreichen Kurs hin, der bisher eingeschlagen wurde. Um der hier beschriebenen Problematik, in der Vorstellung über das Elektron, Herr zu werden, ohne dabei die Theorie zu kritisieren, erscheint eine Modifikation der Sichtweise auf die Welt angemessen zu sein. Die bisherigen Ausführungen zum Strukturenrealismus weisen einen möglichen Weg aus dem Dilemma des *Welle-Teilchen-Dualismus* und der mit ihm verbundenen Vorstellungsproblematik.

Nach dem Strukturenrealismus ist nämlich der Einblick in die Natur, also Erkenntnis eines Objekts durch das Subjekt, nur über die Einsicht in das relationale Verhalten und dessen Beschreibung zwischen den Relata möglich. Das Elektron, sofern es existiert<sup>83</sup>, lässt sich als Entität nicht direkt erkennen, sondern nur sein strukturelles Verhalten in Relationen. Im Hinblick auf JÖNSSONS Doppelspaltversuch lässt sich grob festhalten, dass das Elektron durch seine Fähigkeit zur Interferenz einem stochastischem Verteilungsprozess unterliegt; und ferner, dass sich durch Detektion ein Punkt auf der Fotoplatte färbt.

Das Elektron zeigt in den verschiedenen Versuchen, die im vorangegangenen Kapitel erwähnt wurden, unterschiedliche Weisen, in denen es

---

<sup>83</sup>An dieser Stelle ist der Strukturenrealismus ganz allgemein zu verstehen und nicht als ESR oder OSR.

in Erscheinung tritt. Die Beschreibung der dualistischen Natur durch die *Kopenhagener Deutung*, die im einen Fall Teilchen- und im anderen Fall Welleneigenschaften zeigt, muss im Hinblick auf den Strukturenrealismus aufgegeben werden. Dieser schreibt keine Eigenschaften, sondern gesetzmäßiges Verhalten zu:

„Die Strukturen, von denen der ontische Strukturenrealismus handelt, können keine kategorialen Eigenschaften und damit rein qualitative Eigenschaften sein. Sie sind notwendigerweise an eine bestimmte nomologische Rolle gebunden.“ (Esfeld, 2012b, S.95)

Dem Elektron kommen somit nur strukturelle Eigenschaften zu. Wenn man sich darüber klar wird, dass die Informationen des Elektrons im Formalismus der Quantenmechanik stecken, ermöglicht dieser eine Vorstellung von dem Elektron.<sup>84</sup> Im Bezug auf den *Welle-Teilchen-Dualismus* fällt das Elektron nun nicht mehr unter eine der beiden Termini ('Teilchen' oder 'Welle') in der Spielart der klassischen Physik. Vielmehr ist es vollständig durch den Formalismus beschrieben, der eine Struktur darstellt - und als Grundlage der Theorie auch eine korrekte Beschreibung des Verhaltens liefert.

---

<sup>84</sup>Wobei diese, wie in der Kritik zum SR herausgestellt, abstrakter mathematischer Natur ist.

### 6.3 Folgen für das Messproblem

Die Strukturen der Theorie stecken in ihrer mathematischen Formulierung, die schließlich das Verhalten der einzelnen Quantenobjekte beschreibt. ESFELD schlägt im Zuge seiner Erklärungen des quantenmechanischen Messproblems den ontischen Strukturenrealismus vor, um das Problem zu lösen. Dieser Lösungsversuch ist auf der komplexen Struktur begründet und lässt sich anhand von strukturellen Relationen einzelner theoretischer Entitäten verdeutlichen:

„Zustandsverschränkungen bilden [nach ESFELD] den Kern des Messproblems: Wenn ein Quantensystem mit einem makroskopischen System interagiert, das als Messgerät fungiert, dann werden gemäß dem Formalismus der Quantentheorie die Zustände beider Systeme mit einander verschränkt, statt das Quantensystem einen definiten Wert einer dynamischen Eigenschaft hat und das Messgerät in einem Zustand ist, der einen solchen definiten Wert anzeigt.“ (Esfeld, 2012b, S.90f.)

Dies bedeutet, dass sich das Objekt, welches vom Messgerät erfasst werden soll, sich in einem überlagerten Zustand mit dem Messapparat befindet. Eine solche Verschränkung bzw. Überlagerung der Wellenfunktionen, sei unabhängig von der räumlichen Trennung der beiden Systeme (vgl. Esfeld, 2012b, S.91).

Nun ist es durch spezielle Experimente möglich, bspw. zwei Elektronen mit einander zu koppeln (vgl. ebd., S.91). Diese Kopplung findet über eine physikalische Eigenschaft statt, sodass das eine Elektron immer den komplementären Zustand wie das andere besitzt.<sup>85</sup> Wenn nun beide Elektronen räumlich (weit) von einander getrennt werden und im Anschluss daran der Zustand des einen Elektrons geändert wird, ändert sich instantan auch der Zustand des anderen Elektrons, sodass es nach wie vor den komplementären Zustand aufweist:

---

<sup>85</sup>Anmerkung: Der fachliche Exkurs ist an dieser Stelle wegen seiner Komplexität abgekürzt dargestellt. Die Kopplung betrifft den Eigendrehimpuls der Elektronen, den sogenannten Spin, der nur einen von zwei möglichen Werten annehmen kann (vgl. Tipler/Mosca, 2006, S.310) und sich zwei gleiche Werte bei gekoppelten Teilchen ausschließen (vgl. ebd., S.1162).

„Obwohl die beiden Quantensysteme durch einen beliebigen räumlichen Abstand voneinander getrennt sein können, bleiben sie durch bestimmte Relationen (nämlich Relationen der Zustandsverschränkung) miteinander verbunden, und diese Relationen sind durch keine Eigenschaften festgelegt, die jedem der beiden Quantensysteme unabhängig von dem anderen System zukommen (das heißt, sie sind durch keine intrinsischen Eigenschaften festgelegt).“ (Esfeld, 2012b, S.93f.)

Mit dem Hinweis darauf, dass die Relationen zwischen den Elektronen (als theoretische Entitäten) nicht durch intrinsische Eigenschaften derselben bestimmt sind, sondern zwischen ihnen bestehen, lässt sich eine Parallele zur strukturrealistischen Betrachtung ziehen. Der ontische Strukturenrealismus macht die Objekte der Quantenmechanik nun zu Objekten eines anderen Typs. Während den Elektronen zuvor individuelle und unabhängige Eigenschaften zugesprochen wurden, wird nun der Fokus auf die strukturellen physikalischen Relationen gelegt, die sich in der Verschränkung der einzelnen Relata zeigt. Diese Verschränkung lässt sich aus den oben beschriebenen Experimente entnehmen, die im Zusammenhang zwischen den beiden räumlich getrennten Elektronen besteht. Nicht unumstritten (wie ESFELD anmerkt) lässt diese Sichtweise bspw. als Interpretation der Quantenmechanik verstehen:

„Die nomologische Rolle, welche physikalische Strukturen notwendigerweise einnehmen, ist eine kausale Rolle.“ (Esfeld, 2012b, S.95)

Im Hinblick auf das quantenmechanische Messproblem ergibt sich damit folgendes Bild: Der Formalismus der Quantenmechanik beschreibt die kausale Wirkungsweise der Messung an einem System. Die damit verbundene physikalische Struktur des Ergebnisses offenbart die Relation zwischen dem Messobjekt und einem (oder mehreren) weiteren Relata. Für den Strukturenrealist existiert zwar das Elektron, er kann ihm aber keine Wellen- oder Teilcheneigenschaften zuschreiben, weil es intrinsische Eigenschaften nicht gibt. Das Einzige, was er über die Elektronen wirklich in Erfahrung bringen kann, ist ihr regelmäßiges Verhalten in Beziehung zu anderen Relata. Er kann Gesetzmäßigkeiten erkennen - wie die Detektion von Elektronen in JÖNSSONS Doppelspaltversuch nämlich dazu

fürte, dass einzelne Punkte auf der Fotoplatte erkennbar waren. Ebenso wurde ein sich abzeichnendes Muster ersichtlich, welches abhängig von der Anzahl der Spalte ist, die im Versuch verwendet werden. Damit lässt sich die Vorstellung von der dualistischen Natur des Elektrons vermeiden, weil es sich, je nach Versuch, in anderer Weise präsentiert und sich über sein regelmäßiges Verhalten definiert.

## Teil III

# Fazit

### Zusammenfassung

Mit der Erarbeitung der physikalischen Grundlagen ergab sich ein rekonstruiertes Bild der Entwicklung der Quantentheorie. Die klassische Physik bildete die Ausgangslage, in welcher die Objekte der Erscheinungswelt für den Wissenschaftler durch (miteinander unvereinbare) Eigenschaften von Teilchen und Wellen beschrieben wurde. Mit auftretenden Problemen im Bereich der Strahlung begann schließlich der große Entwicklungsbereich der Quantentheorie. Mit schnell voranschreitenden Entwicklungen in den verschiedensten Bereichen der Physik kristallisierten sich drei charakteristische Elemente der Quantenmechanik heraus: die *Schrödingergleichung*, die HEISENBERG'sche *Unschärferelation* und der *Welle-Teilchen-Dualismus* von DE BROGLIE. Mit den Ausführungen um JÖNSSONS Doppelspaltversuch offenbarte sich ein ungewöhnliches Bild der Natur, welches nun Elektronen als Teilchen und als Wellen erkennen lässt. Ferner zeigte sich in den Ergebnissen ein Interferenzmuster, welches durch das statistische Verhalten bestimmt ist, und schließlich auch die Zerstörung des Wellenmusters durch die Messung. Diese Merkwürdigkeiten sind Indikatoren für das der fertigen und korrekten Theorie anhaftende Problem des quantenmechanischen Messprozesses: Die Unmöglichkeit einer genauen Bestimmung durch Beobachtung.

Mit der sprachlichen Analyse der Aufgabenstellung, in Kombination mit den fachlichen Grundlagen, wurden drei Elemente ausgemacht, die sich für eine philosophische Betrachtung gut eignen:

1. Betrachtung der Theorie und ihre historisch relevante Entwicklung mit Blick auf Interpretationsschwierigkeiten.
2. Verortung der Messung im Bereich der naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung mit dem Fokus auf einer statistischen Sichtweise.
3. Neuordnung des Problems mit einem anderen Verständnis der Natur.

Ein wichtiges Element im Rahmen der Entwicklung von wissenschaftlichen Theorien ist, nach KUHN, die Revolution, welche durch das Lösen von Problemen und ihrer Bewährung gegenüber anderen Paradigmen gekennzeichnet ist. Mit dem Durchbruch zum mathematischen Formalismus nimmt die *Schrödingergleichung* eine solche Rolle als Schlussstein zu einem neuen Paradigma ein. Im Zuge dessen lässt sich das Element der Inkommensurabilität ausmachen: Das Weltbild der klassischen Physik ist, im Vergleich zu dem der Quantenmechanik, ein anderes, da sich nun Wellen- und Teilcheneigenschaften vereinen lassen. Doch auch innerhalb der Theorie der Quantenmechanik lassen sich unterschiedliche Weltbilder bei unterschiedlichen Interpretationen des gleichen Paradigmas auffinden. Die neue Theorie hängt an dem quantenmechanischen Messproblem, dem 'Kollaps der Wellenfunktion'.

Mit der Messung als falsifizierendes Element ergibt sich für POPPER eine andere Sichtweise auf das Problem der Interpretation: Durch eine reine Betrachtung der Wahrscheinlichkeiten ist der 'Kollaps der Wellenfunktion', also eine instantane Änderung des mathematischen Formalismus, nicht vorhanden. Vielmehr ist die Messung eine Feststellung des aktuellen Zustands, der mit der mathematischen Beschreibung über die Wahrscheinlichkeiten nur den aktuellen Zustand des Systems feststellt. Die Beschreibung des Vorgangs und die Feststellung dessen, was gerade vorliegt, sind für POPPER zwei unterschiedliche Wahrscheinlichkeiten. Für ihn vollzieht sich das Geschehen der Natur auch ohne Beobachter, ohne Messung, ohne Kollaps.

Da der Wissenschaftler in einem realistischen Weltbild agiert, ist der Blick auf das Quantenobjekt interessant. Mit einer modifizierten Variante lässt sich der Realismus durch eine strukturelle Komponente in die moderne Physik einführen. Als moderater ontischer Strukturenrealismus beschreibt ESFELD eine Möglichkeit, Objekte anders erfassen zu können: Objekte werden zwar als existierend angesehen, die sich jedoch von den realistisch betrachteten Objekten unterscheiden. Es existieren keine intrinsischen Eigenschaften mehr, die innerhalb der Quantenmechanik unter anderem für die Problematik verantwortlich waren, sondern als wirklich real sind nur noch die Beziehungen zwischen den einzelnen Objekten und ihr regelmäßiges Verhalten.

## Kritische Betrachtung

Es dürfte klar geworden sein, dass sich das quantenmechanische Messproblem mit einigen philosophischen Aspekten verknüpfen lässt. Leider konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht auf weitere Möglichkeiten eingegangen werden, sodass die vorgestellten philosophischen Theorien nur ansatzweise eingeordnet und an ausgewählten Stellen spezifiziert werden konnten. Möglicherweise sind durch dieses Vorgehen manche Ausführungen und Differenzierungen zu kurz gekommen.

Im Rahmen von KUHNS Theorieentwicklung wurde darauf hingewiesen, dass die verschiedenen Interpretationen nicht als Inkommensurabilitäten anzusehen sind, da diese allesamt das gleiche Paradigma umfassen. Dennoch sollte auf die unterschiedlichen Weltbilder, die sich aus den Deutungen ergeben, hingewiesen werden. Ferner ist die *Schrödingergleichung* in der Entwicklung der Quantenmechanik durch ihre mathematische Formulierung zwar ein wichtiges, jedoch ist sie nicht das einzige Element, welches die Revolution begründet hat.

Die POPPERSche Einordnung der Messung innerhalb der Quantenmechanik ermöglicht zwar Widerspruchsfreiheit durch ihre statistische Sichtweise auf die Vorgänge der Natur, jedoch ist das mathematisch-formalistische Problem der *Unschärferelation* mit gleichzeitiger Messung von zwei konträren Elementen nach wie vor ungeklärt. Dies rührt möglicherweise daher, dass die Theorie als unabgeschlossen angesehen wird, weshalb auch die hier dargestellte Sichtweise auch nur eine unvollständige Lösung des Messproblems vermuten lässt.

Mit der Lösung durch den Fokus auf die Erkenntnistheorie nach ES-FELDS moderaten ontischen Strukturenrealismus wird ebenfalls keine Lösung des Formalismus vorgenommen. Dieser fokussiert nämlich sehr stark auf die Vorstellung der einzelnen Objekte, sodass sich der *Welle-Teilchen-Dualismus* nicht mehr als erkenntnistheoretisches Problem darstellt. Eine Anwendung auf den quantenmechanischen Formalismus ist an dieser Stelle durchaus komplex und nur bedingt nachvollziehbar, weil sich das Bezugssystem ändert, in welchem die betrachteten Objekte sich nun anders darstellen.

## Ausblick

Alles in allem ist die vorgenommene Darstellung und Verortung der philosophischen Aspekte im Hinblick auf die Physik zwar interessant, jedoch für diese nicht besonders ausschlaggebend. Der pragmatische Wissenschaftler wird hieraus keine wesentlichen Neuerungen schließen können, da die Quantenmechanik zunächst ein Werkzeug darstellt, welches sich bewährt hat und deren Entwickler höchsten Respekt zu zollen ist. Allerdings ist die Metaebene, die durch eine philosophische Betrachtung eingenommen wird, durchaus hilfreich bei dem Verständnis manch ausgewählter Elemente. Ein Fazit oder eine Lösung zum quantenmechanischen Messproblem zeichnet sich jedoch nicht ab.

Die Quantenmechanik, speziell die *Schrödingergleichung*, hat sich nach KUHN als neues Paradigma erwiesen und löst erfolgreich Probleme. Jedoch ist sie nur ein Schritt der Entwicklung im anscheinend ewigen Rad der Entwicklung von Theorien, die die Natur noch besser beschreiben. So auch bei der Interpretation, bei welcher POPPER in seiner Analyse der *Unschärferelation* auf das metaphysische Element der Unbestimmtheit hinweist, die sich bei HEISENBERG abzeichnet. Zwar lässt sich mit seiner Sichtweise die Theorie widerspruchsfrei verstehen, allerdings eröffnet sie das Feld für einen ontologischen Rahmen. Als Vorstellungsmöglichkeit bietet sich diesbezüglich in der modernen Physik der Strukturrealismus nach ESFELD an, der das Bild einer existenten Welt annimmt, jedoch Strukturen als einzig Erkennbares herausstellt. Durch die komplexe Anwendung auf die Quantenmechanik lässt sich jedoch nur ein vages Bild erahnen.

Abschließend soll gesagt sein, dass sich verschiedenste philosophische Aspekte innerhalb der Physik wiederfinden lassen. Die Philosophie nimmt im naturwissenschaftlichen Kontext eine Metaebene ein, die dabei helfen kann, Probleme zu analysieren, zu klären oder in einem anderen Licht erscheinen zu lassen. Deshalb ist es offensichtlich von entscheidender Bedeutung, dass die beiden Disziplinen mit einander an Problemen arbeiten. Die Kooperation beider Wissenschaften ist für beide Seiten förderlich und sollte im Zuge der Erkenntnisgewinnung über die Natur nicht vernachlässigt werden, da sowohl Physiker als auch Philosophen schließlich danach suchen, was die Welt nun wirklich im Innersten zusammenhält.

## Literatur

- Ainsworth, Peter M. (2010):** 'What is ontic structural realism?'. In 'Studies in History and Philosophy of Modern Physics', 41, S.50–57.
- Arndt, Markus/Nairz, Olaf (1999):** 'Grenzgänger: Welle-Teilchen Dualismus von C 60'. PLUS LUCIS, 3, S.5–7.
- Bain, Jonathan/Norton, John D.; Buchwald, Jed Z./Warwick, Andrew (Hrsg.) (2001):** Kap. 'What Should Philosophers of Science Learn from the History of the Electron?' In 'Histories of the Electron: The Birth of Microphysics'. Cambridge: MIT Press, S.451–465.
- Bell, John S. (2012):** 'Sechs mögliche Welten der Quantenmechanik'. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH.
- Bohr, Nils; Schilpp, Paul A. (Hrsg.) (1979):** Kap. 'Diskussion mit Einstein über erkenntnistheoretische Probleme in der Atomphysik'. In 'Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher'. Braunschweig: Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, S.115–150.
- Busch, Paul/Jaeger, Gregg (2009):** Kap. 'Which-Way or Welcher-Weg-Experiments'. In 'Compendium of Quantum Physics'. Berlin/Heidelberg: Springer Verlag, S.845–851.
- Crease, Robert P. (2002):** 'The most beautiful experiment'. In 'Physics World', 9, S.19–20.
- Detel, Wolfgang (2007):** 'Grundkurs Philosophie. Band 4: Erkenntnis- und Wissenschaftstheorie'. Stuttgart: Philipp Reclam jun. GmbH & Co. KG.
- Düsberg, Klaus Jürgen; Keuth, Herbert (Hrsg.) (2007):** Kap. 'Bemerkungen zur Quantenmechanik'. In 'Logik der Forschung'. Berlin: Akademie Verlag GmbH, S.217–236.
- Esfeld, Michael (2012a):** 'Philosophie der Physik'. Berlin: Suhrkamp Verlag.
- Esfeld, Michael; Esfeld, Michael (Hrsg.) (2012b):** Kap. 'Das Messproblem der Quantenmechanik heute: Übersicht und Bewertung'. In 'Philosophie der Physik'. Berlin: Suhrkamp Verlag, S.88–109.

- Esfeld, Michael/Lam, Vincent (2008):** 'Moderate structural realism about space-time'. In 'Synthese', 160, S.27–46.
- Grehn, Joachim/Krause, Joachim (Hrsg.) (2009):** 'Physik'. Braunschweig: Westermann Schroedel Diesterweg Schönigh Winklers GmbH.
- Gribbin, John (1996a):** 'Auf der Suche nach Schrödingers Katze'. München: R. Piper GmbH & Co. KG.
- Gribbin, John (1996b):** 'Schrödingers Kätzchen und die Suche nach der Wirklichkeit'. Frankfurt am Main: S. Fischer Verlag GmbH.
- Hacking, Ian (1996):** 'Einführung in die Philosophie der Naturwissenschaften'. Stuttgart: Philipp Reclam jun. GmbH & Co. KG.
- Haugk, Michael/Fritsche, Lothar (2012):** 'Quantenmechanik für Ahnungslose'. Stuttgart: S. Hirzel Verlag.
- Heisenberg, Werner (1925):** 'Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen'. In 'Zeitschrift für Physik', 33, S.879–893.
- Heisenberg, Werner; Busche, Jürgen (Hrsg.) (1979):** 'Quantentheorie und Philosophie'. Stuttgart: Philipp Reclam jun. GmbH & Co. KG.
- Hoyningen-Huene, Paul; Schmidt, Siegfried J./Finke, Peter (Hrsg.) (1989):** 'Die Wissenschaftsphilosophie Thomas S. Kuhns'. Braunschweig: Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH.
- Hund, Friedrich (1984):** 'Geschichte der Quantentheorie'. Zürich: Bibliographisches Institut AG.
- Jönsson, Claus (1961):** 'Elektroneninterferenzen an mehreren künstlich hergestellten Feinspalten'. In 'Zeitschrift der Physik', 161, S.454–474.
- Kuhn, Thomas S. (1991):** 'Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen'. Frankfurt am Main: Suhrkamp Verlag.
- Küblbeck, Josef/Müller, Rainer; Farber, Max-Ulrich (Hrsg.) (2003):** 'Die Wesenszüge der Quantenphysik'. Köln: Aulis Verlag Deubner.

- Kügler, Peter; Hug, Theo (Hrsg.) (2001):** Kap. 'Was tun Wissenschaftler?' In 'Wie kommt Wissenschaft zu Wissen? Band 4: Einführung in die Wissenschaftstheorie und Wissenschaftsforschung'. Baltmannsweiler: Schneider Verlag GmbH, S.160–173.
- Ladyman, James; Zalta, Edward N. (Hrsg.) (2014):** Kap. 'Structural Realism'. In 'The Stanford Encyclopedia of Philosophy'. [URL: http://plato.stanford.edu/archives/spr2014/entries/structural-realism/](http://plato.stanford.edu/archives/spr2014/entries/structural-realism/), Recherche: 15.10.2014.
- Lemmerich, Jost (1998):** Kap. 'The history of the discovery of the electron'. In 'XVIII International Symposium on Lepton-Photon Interactions LP 97'. Singapore: World Scientific Publishing, S.617–627.
- Lyre, Holger (2006):** 'Strukturenrealismus'. In 'Information Philosophie', 34, S.32–37.
- Lyre, Holger; Esfeld, Michael (Hrsg.) (2012):** Kap. 'Symmetrien, Strukturen, Realismus'. In 'Philosophie der Physik'. Berlin: Suhrkamp Verlag, S.368–389.
- Nolting, Wolfgang (2009):** 'Theoretische Physik 5/1 (Quantenmechanik - Grundlagen)'. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.
- Pietschmann, Herbert (2003):** 'Quantenmechanik verstehen'. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.
- Poincaré, Henri; L. Lindemann, F. und (Hrsg.) (1904):** 'Wissenschaft und Hypothese'. Leipzig: B. G. Teubner.
- Popper, Karl R. (1979):** 'Die beiden Grundprobleme der Erkenntnistheorie'. Tübingen: Mohr Verlag.
- Popper, Karl R.; Bartley, W. W. (Hrsg.) (2001):** 'Die Quantentheorie und das Schisma der Physik'. Tübingen: Mohr Siebeck Verlag.
- Popper, Karl R. (2002):** 'Logik der Forschung'. Tübingen: Mohr Siebeck Verlag.
- Richter, Wolfgang (2008):** Broschüre 'Quantensprünge'. In der Veranstaltungsreihe 'Highlights der Physik'. Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V. & Bundesministerium für Bildung

und Forschung. [URL: http://www.weltderphysik.de/vorort/highlights-der-physik/2008-quantenspruenge/](http://www.weltderphysik.de/vorort/highlights-der-physik/2008-quantenspruenge/), Recherche: 17.09.2014.

**Schrödinger, Erwin (1935a):** 'Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik' (Teil 1). In 'Die Naturwissenschaften', 48, S.807–812.

**Schrödinger, Erwin (1935b):** 'Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik' (Teil 2). In 'Die Naturwissenschaften', 49, S.823–828.

**Schrödinger, Erwin (1935c):** 'Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik' (Teil 3). In 'Die Naturwissenschaften', 50, S.844–849.

**Tipler, Paul A./Mosca, Gene; Pelté, Dietrich (Hrsg.) (2006):** 'Physik für Naturwissenschaftler und Ingenieure'. München: Elsevier GmbH.

## **Eigenständigkeitserklärung**

Ich versichere hiermit, dass ich, André Göller, die vorliegende wissenschaftliche Hausarbeit für das erste Staatsexamen mit dem Titel

### **Philosophische Aspekte des quantenmechanischen Messproblems**

selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen, die anderen Werken dem Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen wurden, habe ich in jedem einzelnen Fall durch die Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht. Diese Versicherung gilt ebenfalls für die verwendeten Bilder und Skizzen.

Dorfborn, den 12.11.2014

André Göller