

I DIE ENTWICKLUNG DER QUANTENTHEORIE

»Als ich ihn [Heisenberg] kennenlernte – es war in Kopenhagen, er war 25 Jahre alt und ich 14 –, zeigte er mir Bohrs Institut, auch dessen Bibliothek. Ich war beeindruckt und etwas verstört von dem Haufen Mathematik, den ich theoretischer Physiker würde lernen müssen. Er sagte: ›Das brauchst du aber. Freilich, die Natur rechnet nicht. Aber wir müssen rechnen, wenn wir sie verstehen wollen.‹ Er sagte gern: ›Die Mathematik ist klüger als wir.‹ Er meinte, sie enthält und enthüllt bei richtigem Gebrauch Strukturen, die zu erfassen unser Anschauungsvermögen noch zu schwach war. Aber Heisenbergs eigene Stärke als Forscher lag in einer Gabe, die ich intellektuelle Anschauung nennen würde. Er war nie mit einem Ergebnis zufrieden, das nur durch Rechnung gefunden war; er traute dem Ergebnis, wenn es ihm auch intuitiv deutlich geworden war. Ich erinnere mich aus meinen Studentenjahren an einen Vergleich mit Born und Heisenberg, den einer der jungen Theoretiker zog: Wenn Born und Heisenberg durch ein physikalisches Problem auf ein Integral geführt werden, sagt Born: ›Wir werden es ausrechnen und sehen, was es bedeutet;‹ Heisenberg aber sagt: ›Sehen wir, was es bedeutet, dann werden wir sehen, wie wir es ausrechnen können.‹ [...] Als ich bei ihm in Leipzig Physik studierte, fragte er mich einmal, was ich gerade in der Mathematik treibe. Er sah offensichtlich, daß ich mathematische Schulung nötig hatte. Ich antwortete: ›Ich lerne Mengenlehre.‹ Er: ›Das sollst du nicht lernen.‹ Ich: ›Aber die Mengenlehre ist doch die Grundlage, und sie interessiert mich philosophisch.‹ Er erwiderte: ›Nein, sie ist lauter Unsinn. Glaube den Mathematikern nicht, wenn sie dir weismachen wollen, es gebe so etwas wie eine aktuell unendliche Punktmenge. Könnte man so etwas beobachten?«¹

In diesem Kapitel werden wir versuchen, aus einer innerphysikalischen Perspektive die Bezugsprobleme zu rekonstruieren, die zur Entwicklung der Quantentheorie geführt haben. Wir beginnen dabei mit der Entdeckung des Planckschen Wirkungsquantums und enden

¹ v. Weizsäcker (1992, 800 f.).

mit John v. Neumanns mathematischer Grundlegung, mit der die Quantentheorie ihren formalen Abschluss fand.

In den unterschiedlichen Stationen wird deutlich, dass die Entwicklung der Quantentheorie nur als ein raffiniertes Wechselspiel aus ›physikalischer Theoriebildung‹, ›abstrakter mathematischer Formalisierung‹ und ›Experimentalphysik‹ verständlich wird.

Schon Plancks Arbeit lässt sich nur nachvollziehen, wenn man Physik und Mathematik als zwei getrennte Bereiche und Denkformen annimmt, die in ihrer jeweiligen Entwicklung eng miteinander in Beziehung stehen, jedoch spätestens in der Epoche der Quantenphysik nicht mehr gleichgesetzt werden dürfen. Die physikalische Denkform sucht nach Erklärungen und legt ihren Argumentationen entsprechend Gedankenexperimente zugrunde, die auf physikalischen Modellen und Anschauungen beruhen, die – in welch abstrakter Form auch immer – in unseren Alltagserfahrungen gründen. Die Mathematik hingegen kann, sobald sie sich als autonome Disziplin wissenschaftlich verselbstständigt hat, von jeglichem empirischen Bezug absehen und sich allein auf ihre eigene Formentwicklung beziehen. Gerade dies erlaubt jedoch der Physik, auf mathematische Formen zurückzugreifen, die zwar physikalisch (noch) keinen Sinn ergeben, sich aber dennoch an die Daten anschmiegen können, welche die Experimentalphysik generiert hat. Dies eröffnet die Möglichkeit, zunächst mathematische Lösungen zu (er)finden, um dann erst zu schauen, unter welchen Voraussetzungen sie physikalisch Sinn ergeben.

Auf der anderen Seite wiederum liefert die physikalische Theoriebildung eine Vielzahl eigener Formen, auf die wiederum bei neuen Problemstellungen zurückgegriffen werden kann. Man kann es mit dynamischen Feldern oder euklidischen Räumen probieren, Teilchen- oder Wellenmodelle austesten, entsprechend der Wärmelehre auf statistische Verfahren zurückgreifen, um makroskopisches Verhalten vorherzusagen, oder gar mit der Entropie informationstheoretische Modalitäten einführen, um Sachverhalte erklären zu können.

Das Wechselspiel von Formen aus der mathematischen und der physikalischen Theoriebildung eröffnet Rekombinationsmöglichkeiten, die es wahrscheinlich werden lassen, seltsame – man ist fast geneigt zu sagen, absurde – Weltmodelle zu entwickeln, insofern die Daten, welche die Weltbeobachtung liefert, es irgendwie noch zulassen.

Ein schönes Beispiel hierfür ist die Schrödinger-Gleichung. Man greift auf die physikalische Intuition zurück, das Problem der Quantisierung mittels der Idee von oszillierenden Feldern zu beschreiben, und trifft dann auf mathematische Formen, die das Problem in einer

Weise lösen, die mit den Experimentaldaten übereinstimmt. Die genauere mathematische Untersuchung der auf diese Weise erhaltenen Wellenfunktion zeigt dann jedoch, dass die gefundenen Beziehungen keine inhaltliche Entsprechung mit den Wellenbeziehungen haben, die aus der klassischen Physik bekannt sind. Hieraus entsteht nun für die physikalische Theoriebildung ein neues Bezugsproblem, denn man verfügt jetzt über eine in sich plausible mathematische Beziehung, jedoch nicht über eine physikalische Interpretation der hiermit beschriebenen Verhältnisse.

Ein in dieser Weise vorangetriebenes Wechselspiel von Mathematik und Physik erzeugt produktive Krisen, welche Experiment und Theoriebildung immer weiter vorantreiben. Gleichzeitig werden in einem solchen Arrangement jedoch auch Strategien der Paradoxie-beruhigung nötig. Nolens volens betritt man mit einer solchen Weise der Theoriebildung »Welten ohne Grund«,² denn man begegnet Zirkularitäten, welche es unmöglich machen, die Beobachtungsverhältnisse stabil zu halten.

Die Untersuchung der hier angedeuteten Beziehungen zwischen den von Mathematik und Physik erzeugten Bezugsproblemen verlangt es, mit hinreichender Tiefe in die beforschten Felder einzudringen. Im Folgenden ist es deshalb nicht zu vermeiden, etwas detaillierter auf physikalische und mathematische Zusammenhänge einzugehen. Wenn man die hiermit verbundenen Mühen nicht scheut, zeigen sich jedoch faszinierende Einsichten in die Art und Weise, wie in der modernen Physik Theoriebildung vonstatten geht. Es zeigen sich die epistemischen Eigenarten der Quantentheorie und die hiermit verbundenen Paradoxien sowie die innerphysikalisch eingeschlagenen Wege der Paradoxieentfaltung. Wir begegnen dabei einer Physik, die nolens volens in Kontakt mit der Metaphysik kommt, diese Begegnung aber wiederum auf mehr oder weniger geschickte Weise ausblenden muss, um weiterhin Physik bleiben zu können.

Die Entdeckung des Planckschen Wirkungsquantums

Der Beginn der Quantentheorie lässt sich recht genau definieren, nämlich mit der Einsicht von Max Planck, dass sich das Strahlungsverhalten eines schwarzen Körpers nur angemessen beschreiben lässt, wenn man hypothetisch annimmt, dass die Strahlungsaufnahme oder abgabe gequantelt, das heißt in Form diskreter Energieelemente stattfindet.

Versuchen wir, uns im Folgenden die Problemstellung zu vergegenwärtigen, die Planck zur Quantenhypothese geführt hat. Jeder weiß

² Varela et al. (1992a, 344).

aus eigener Erfahrung, dass sich schwarze Dinge durch Sonneneinstrahlung stärker erwärmen als weiße Gegenstände. Ein schwarzer Körper schluckt im Idealfall vollkommen die auf ihn einwirkende elektromagnetische Strahlung, sei es in Form von Wärme, sichtbarem Licht oder höherfrequenterer Strahlung. Zugleich strahlt er jedoch wiederum Energie ab. Für das Verhältnis von Strahlung und Absorption zeigt sich zunächst der einfache Befund, dass der »Quotient aus der von einem Körper pro Flächen- und Zeiteinheit ausgestrahlten Strahlungsenergie e und dem Absorptionsvermögen a ($0 \leq a \leq 1$)« von der »stofflichen Beschaffenheit des Körpers unabhängig« ist und nur »eine von der Temperatur des Körpers und der Frequenz der Strahlung abhängige Funktion« darstellt.³

Experimentell lässt sich nun ein Gleichgewicht erzeugen, indem die vom Körper abgestrahlte Energie der aufgenommen Energie entspricht. Dies lässt sich beispielsweise durch eine metallische Hohlkugel annähernd realisieren. Da das Metall, das die Wärme gespeichert hat, auch in den Hohlraum abstrahlt, ist auch das Innere der Kugel mit Strahlung angefüllt. Die sogenannte schwarze Strahlung befindet sich dann bei gegebener Temperatur und daraus folgender Intensität in einem Gleichgewicht, da von den Hohlrauminnenflächen die gleiche Menge Strahlung absorbiert wie ausgesendet wird. Wenn man nun ein Loch in die Kugel bohrt, das so klein ist, dass das Gleichgewicht nicht gestört wird, aber so groß, dass man die Energie der Strahlung messen kann, dann lässt sich die Temperaturabhängigkeit der Strahlungsfrequenzen untersuchen.

Da die Energie einer Strahlung umgekehrt proportional ihrer Frequenz ist, lässt sich auch die Beziehung zwischen der gesamten ausgestrahlten Energie und dem Spektrum (also der Verteilung der unterschiedlichen Frequenzen in der Gesamtstrahlung) untersuchen. Erhitzt man die Metallkugel, so beginnt sie zunächst, für das Auge unsichtbar, Infrarot auszustrahlen. Bei höherer Temperatur beginnt sie rot zu glühen, bei noch stärkerer Erhitzung verschiebt sich das Spektrum in Richtung gelb usw.

Zu Plancks Zeiten bestanden unterschiedliche Ansätze, das empirisch zu beobachtende Frequenzspektrum zu beschreiben sowie physikalisch zu erklären. Man hatte zum einen das Wien-Planck-Gesetz, welches einer bestimmten, theoretisch geleiteten Vorstellung folgte. Die Strahlungsbeziehung wurde hier in Referenz auf die Hertz'sche Theorie der elektromagnetischen Wellen dadurch erklärt, dass man annimmt, dass die Hohlraumwand »aus Oszillatoren mit der Eigenfrequenz v « besteht, die aus »positiven und negativen Ladungen« gebildet werden, »die mit elastischen Kräften aneinander gekoppelt

³ Simonyi (2004, 426).

sind« und entsprechend schwingen können. Der Gleichgewichtszustand erklärt sich dadurch, dass »ein Teil der Oszillatoren größere, ein anderer wieder kleinere Amplituden« hat, »wobei die Verteilung der Amplituden von der Zeit unabhängig und fest vorgegeben ist. Addieren wir die Energien aller Oszillatoren und dividieren durch ihre Zahl, so erhalten wir die mittlere Energie pro Oszillatator $U(v, T)$ «. Auf diese Weise lässt sich dann erklären, warum und wie sich das Maximum der Intensitätsverteilung und damit auch die Farbcharakteristik der Strahlung mit der Temperatur verändert.⁴

In den Experimenten zeigte sich nun aber, dass das vorgeschlagene Gesetz das Strahlungsverhalten von schwarzen Körpern bei hohen Frequenzen zwar recht gut beschreiben kann, jedoch leider bei niedrigen Frequenzen versagt. Man sprach damals in Bezug auf die Grenze der Erklärung von einer »Infrarotkatastrophe«.

Zum anderen hatte man aber auch das Rayleigh-Jeans-Gesetz, das sich »auf ein sehr allgemeines Prinzip der klassischen Statistik, den Gleichverteilungssatz« gründete. Mit diesem Gesetz konnte man die Experimente bei niedrigen Frequenzen richtig beschreiben, doch das Gesetz führte zu einer »Ultraviolettkatastrophe«, das heißt, bei hohen Frequenzen führt es zu unsinnigen Vorhersagen, die weder empirisch noch theoretisch Sinn ergeben.⁵

Man hatte jetzt also zwei Gesetze, die jeweils ein Teilspektrum der empirischen Verhältnisse exakt beschreiben konnten, sich jedoch nicht übergreifend als gültig zeigten. Zudem folgten beide Gesetze einer unterschiedlichen theoretischen Intuition und man hatte entsprechend keine Idee, durch welche physikalische Begründung man das Dilemma aufklären konnte. Bemerkenswert ist hier die Wortwahl, mit welcher die damaligen Physiker die Problemlage kennzeichneten. Der Begriff »Katastrophe« beinhaltet in seinem Bedeutungshof eine fundamentale Erschütterung des Bestehenden. Die mathematisch-physikalische Ordnung funktioniert nicht mehr.

Planck hatte nun die glückliche Intuition, es mit den Formeln der Entropie zu probieren. Hierzu bildete er sowohl vom Wien-Planck-Gesetz als auch vom Rayleigh-Jeans-Gesetz die Ableitungen nach der Entropie und untersuchte, ob sich auf diesem Wege möglicherweise Einsichten in einen übergreifenden Zusammenhang ergeben könnten. Planck hatte sich in seinen früheren Arbeiten bereits intensiv mit der Wärmetheorie und den Hauptsätzen der Thermodynamik beschäftigt, so dass der hiermit eingeschlagene Weg für ihn zunächst nicht ungewöhnlich war. Er war mit dieser Tradition durch eigene Forschungen intensiv vertraut und in diesem Sinne erschien es für

4 Ebd., 429.

5 Ebd., 429.

ihn nicht abwegig, es einmal mit den Gesetzen der Entropie zu versuchen.⁶

Da sich die zweite Ableitung der Entropie S als umgekehrt proportional zum Quadrat der Energie U zeigte, offenbarte sich nun ein einfaches Schema:

Wien-Planck

$$\frac{\partial^2 S}{\partial U^2} = \frac{\text{Konst}}{U}$$

Rayleigh-Jeans

$$\frac{\partial^2 S}{\partial U^2} = \frac{\text{Konst}}{U^2}$$

Die beiden Gleichungen lassen sich durch eine einfache Interpolationsformel miteinander in Beziehung setzen, die darauf beruht, dass man im Nenner eine weitere Konstante einführt:

$$\frac{\partial^2 S}{\partial U^2} = \frac{a}{U(U+b)}$$

Bei großen Energien spielt die Konstante b rechnerisch keine Rolle und die Gleichung nähert sich dem Rayleigh-Jeans-Gesetz an. Bei kleinen Energien übt die Konstante demgegenüber den dominanten Effekt aus, weshalb sich die Beziehung nun der Dynamik der Wien-Planck-Gleichung annähert. Bei entsprechender Wahl von b lässt sich eine Gleichung finden, welche die bei der Hohlraumstrahlung gefundenen empirischen Verhältnisse hervorragend abbilden kann. Genauere Messverfahren konnten schließlich zeigen, dass die gefundene Lösung für den gesamten Frequenzbereich eine Übereinstimmung zwischen Formel und Daten liefern kann.

6 »Bei der eingehenden Beschäftigung mit diesem Problem fügte es das Schicksal, daß ein früher von mir unliebsam empfundener äußerer Umstand: der Mangel an Interesse der Fachgenossen für die vom mir eingeschlagene Forschungsrichtung, jetzt gerade umgekehrt meiner Arbeit als eine gewisse Erleichterung zugute kam. Damals hatte sich nämlich eine ganze Anzahl hervorragender Physiker sowohl von der experimentellen als auch von der theoretischen Seite her dem Problem der Energieverteilung im Normalspektrum zugewandt. Aber alle suchten nur in der Richtung, die Strahlungsintensität K als Funktion der Temperatur T darzustellen, während ich in der Abhängigkeit der Entropie S von der Energie U den tieferen Zusammenhang vermutete. Da die Bedeutung des Entropiebegriffs damals noch nicht die ihr zukommende Würdigung gefunden hatte, so kümmerte sich niemand um die von mir benutzte Methode, und ich konnte in aller Muße und Gründlichkeit meine Berechnungen anstellen, ohne von irgendeiner Seite eine Störung oder Überholung befürchten zu müsse.«. Planck (1958) Physikalische Abhandlungen und Vorträge. Bd. III. S. 261. Zitiert nach Simonyi (2004, 431).

Da die Formel aber auf einer Interpolation beruht, also auf einer mathematischen Hilfsfunktion, welche ansonsten nicht übereinstimmende Kurven verbindet, fehlte zunächst eine theoretische bzw. physikalische Begründung für die auf rein mathematischem Wege gefundene Beziehung. Das neue physikalische Gesetz entwickelte sich damit weniger aus einer physikalisch anschaulichen Intuition heraus, sondern aus einem Ausprobieren mathematischer Formen, die aus anderen physikalischen Teilgebieten entlehnt sind oder mit der Interpolationsformel eine ganz neue Beziehung erfinden lassen.

Insbesondere Planck selbst suchte intensiv nach einer möglichen physikalischen Erklärung. Dabei folgte er weiterhin seiner Intuition, dass der Schlüssel für das Verständnis des Problems möglicherweise in den Gesetzen der Entropie liegen könnte.

Gehen wir an dieser Stelle kurz auf die maßgeblich von Boltzmann geprägte Theorie der Entropie ein. Entsprechend dieser gibt es nicht nur eine makroskopische Deutung der Wärmelehre, entsprechend der – platt gesprochen – die Wärme von der heißeren Seite zur kälteren fließt, sondern auch eine mikroskopische Deutung. Diese geht von einerzählbaren Menge von Elementarteilchen aus, die jeweils eine begrenzte Anzahl von Freiheitsgraden besitzen, in denen sie sich bewegen können. Aus den Teilchenzahlen und den Freiheitsgraden, entsprechend denen sich die Teilchen bewegen können, kann man nun eine endliche Anzahl von Anordnungen errechnen, in denen die Teilchen zueinanderstehen können. Die Gesamtheit der hieraus möglichen Erscheinungsbilder lässt sich dann auszählen und mit Wahrscheinlichkeiten unterlegen.

Auf diese Weise bekommt die Entropie dann eine informationstheoretische Deutung.⁷ Sie kann auf diese Weise mit dem gleichgesetzt werden, was man prinzipiell wissen kann. Hat man beispielsweise alle sich schnell bewegenden Teilchen auf der einen Hälfte eines Behälters (›Wärme‹) und alle sich langsam bewegenden Teilchen auf der anderen Hälfte (›Kälte‹), so braucht man weniger Informationen, um das Arrangement der Teilchen zu beschreiben (sie sind ja geordnet),

⁷ Hierzu Weizsäcker: »Der Ausgangspunkt ist die Identität der Definition von Entropie und syntaktischer Information. Die in der üblichen Sprechweise bestehende Unklarheit über das Vorzeichen der Information lässt sich durch die zeitliche Deutung einfach lösen: Entropie ist potentielle Information, negative Entropie ist aktuelle Information. Man kann dann zeigen, daß Evolution als Wachstum einer geeignet definierten potentiellen Information erklärt werden kann, also in der Tat als Wachstum der Entropie. Die viel erörterte Schwierigkeit, Entropiewachstum und Evolution zu vereinbaren, erweist sich als bloße Folge unscharf definierter Begriffe. Die generelle Deutung der Entropie als Maß der Unordnung ist nichts als eine sprachliche und logische Schlampelei« (v. Weizsäcker 1994, 164 f.).

als wenn die ›warmen‹ und ›kalten‹ Teilchen unsortiert sind und die ihnen möglichen Freiheitsgrade ausnützen, was einem außenstehenden Beobachter dann als Unordnung erscheinen mag, denn nun braucht man viel mehr Informationen, um das Bild zu beschreiben.

Kommen wir zurück zu Plancks bahnbrechender Arbeit, die eine physikalische Erklärung der von ihm zuvor gefundenen mathematischen Formel liefern konnte. Auf Basis der mikroskopischen Interpretation der Entropie gelang es ihm schließlich, eine wahrscheinlichkeitstheoretische Deutung des von ihm entdeckten Zusammenhangs zu finden. Ausgangspunkt seiner Überlegungen ist die Boltzmannsche Beziehung zwischen der Entropie S und dem Logarithmus der thermodynamischen Wahrscheinlichkeit W , beschrieben durch die Formel $S = k \ln W$, wobei k die Boltzmann-Konstante darstellt.

Die thermodynamische Wahrscheinlichkeit W zeigt sich dabei proportional zur Anzahl der Realisierungsmöglichkeiten, über die ein beobachtbarer Makrozustand erzeugt werden kann. So lässt sich beispielsweise ein ›lauwarmer‹ Zustand in dem oben benannten Behälter durch sehr viele unterschiedliche räumliche Anordnungen von warmen und kalten Teilchen verwirklichen. Die strenge Trennung von warm und kalt in zwei Hälften lässt sich demgegenüber nur in einer einzigen räumlichen Anordnung erreichen. Die Realisierung des gemischten lauwarmen Zustands hat demgegenüber eine wesentlich höhere Wahrscheinlichkeit als die separierten Temperaturbereiche.

Wenn aber nun W die thermodynamische Wahrscheinlichkeit eines Makrozustandes und diese wiederum proportional zur Anzahl der Realisierungsmöglichkeiten des Makrozustandes ist, dann lässt sich W auch für das Strahlungsgleichgewicht in schwarzen Körpern mittels den Regeln der Kombinatorik ausrechnen, insofern es gelingt, die möglichen Zustandsvariationen durch ein angemessenes Modell darzustellen. Schildern wir mit Simonyi kurz die Grundidee von Plancks Modellierung, mit der zum ersten Mal die Idee der Quantisierung in die Physik eingeführt wurde:

»Um jedoch das kombinatorische Verfahren, das zur Bestimmung der Realisierungsmöglichkeiten eines Makrozustandes dient, [...] auf das Problem der schwarzen Strahlung anwenden zu können, muß die Gesamtenergie auf eine endliche Zahl von Teilenergien endlicher Größe aufgeteilt werden. Daraus folgt weiter, daß die Oszillatoren nur ganzzahlige Vielfache eines Energieelements endlicher Größe aufnehmen können. Zu dieser Zeit und in dieser Form sind zum ersten Mal in der Geschichte der Physik die Begriffe Energieelement und Energiequant aufgetaucht«.⁸

8 Simonyi (2004, 431).

Planck führte seine Überlegungen auf Basis eines theoretischen Modells durch, das auf N Resonatoren und P Energieelementen besteht und führte eine Beispielrechnung für die Zahl $N = 100$ durch, um zu zeigen, dass seine Überlegungen zu sinnvollen Ergebnissen führen, die mit empirisch bestätigten Beziehungen im Einklang stehen. Schauen wir uns ein Zitat aus der Originalarbeit an, in der er seine Ergebnisse zum ersten Mal veröffentlichte:

»Nun ist einleuchtend, daß die Verteilung der P Energieelemente auf die N Resonatoren nur auf eine endliche, ganz bestimmte Anzahl von Arten erfolgen kann. Jede solche Art der Verteilung nennen wir nach einem von Hrn. Boltzmann für einen ähnlichen Begriff gebrauchten Ausdruck eine ›Komplexion‹. [...] Die Anzahl aller möglichen Komplexionen ist offenbar gleich der Anzahl aller möglichen Ziffernbilder, die man auf diese Weise, bei bestimmten N und P für die untere Reihe erhalten kann. Um jedes Missverständnis auszuschließen, sei noch bemerkt, daß zwei Komplexionen als verschieden anzusehen sind, wenn die entsprechenden Ziffernbilder dieselben Ziffern, aber in verschiedener Anordnung, erhalten. Aus der Kombinationslehre ergibt sich die Anzahl aller möglichen Komplexionen [...]:

$$\frac{(N + P - 1)!}{(N - 1)! P!} \quad \text{„}^9$$

Hiermit hatte Planck nun eine physikalische Erklärung geschaffen, die sich im Einklang mit der korrekten Formel für die schwarze Strahlung befand. Zugleich hat er damit die Idee der Quantelung in die Physik eingeführt.

Man kann die Bedeutung des hiermit geleisteten Durchbruchs für die physikalische Theoriebildung kaum hoch genug einschätzen. Mit »Hilfe der von ihm abgeleiteten Gleichungen ist es Planck gelungen, ein kohärentes System von Zahlenwerten für die grundlegenden mikrophysikalischen Naturkonstanten zu erhalten. So hat er aus den experimentell bestimmten Konstanten des Stefan-Boltzmann-Gesetzes und des Wienerschen Verschiebungsgesetzes die Plancksche Konstante und die Boltzmann-Konstante berechnet«.¹⁰

Rekapitulieren wir die Geschichte der Entdeckung des Planckschen Wirkungsquantums. Zwei mathematische Beziehungen, die jeweils einen Teilbereich der empirischen Verhältnisse beschreiben und die auf zwei unterschiedlichen physikalischen Erklärungen beruhen, werden in einer mathematischen Interpolation zusammenge-

⁹ Planck [1900](1958, 700).

¹⁰ Simonyi (2004, 433).

führt. Diese beschreibt zwar die Beziehung mathematisch richtig, hat jedoch keine physikalische Erklärung. Im Rekurs auf die wahrscheinlichkeitstheoretische Interpretation der Entropie gelingt Planck eine physikalische Deutung der Beziehung, welche im Einklang mit dem mathematischen Formalismus steht, der die empirischen Verhältnisse korrekt beschreibt. Diese Erklärung beruht auf der Anschauung, dass die Gesamtenergie in diskreten Teilen auf eine konkrete Anzahl von ›Resonatoren‹ aufgeteilt wird. Erstaunlicherweise haben sich auf diesem Wege sowohl Begriffe als auch physikalische Konstanten, die aus unterschiedlichen physikalischen Traditionen stammen, produktiv zueinander in Beziehung setzen lassen.

Wir treffen hier auf eine Physik, die in unterschiedlichen Bereichen Anschauungen und Konzepte entwickelt hat, jetzt aber durch die Experimentalphysik herausfordert wird, neue Rekombinationen von Theoriebereichen und Erklärungen für die experimentellen Befunde zu finden. Auf diese Weise gelangt Planck schließlich zur Idee gequantelter Wirkungen. Die physikalische Rahmentheorie, aus der sich Plancks Erklärung ableitet, ist hier noch klassisch gebaut.

*Einstein: Die Quantelung des Lichts
und die ›Krise der Physik‹*

Auch wenn Planck mit seiner Arbeit von 1900 den ersten Grundstein zur Quantentheorie gelegt hatte, heißt dies nicht, dass er damit auch bereit war – oder überhaupt die Notwendigkeit sah –, die bislang geltenden Beschreibungswisen der Physik aufzugeben. Aus seiner Perspektive hatte er mit der Entdeckung des Wirkungsquantums auf Boltzmanns Konzeption der statistischen Mechanik zurückgegriffen, die zwar auf stochastischen Beschreibungen beruht, aber von ihrer Ontologie her weiterhin davon ausgeht, dass Materie aus konkreten Teilchen besteht und Strahlung ausschließlich als Wellen zu beschreiben ist. Dies wird etwa deutlich an den Vorbehalten, die Planck noch im Jahr 1912 gegenüber Einsteins Hypothese vorgebracht hatte, auch das Licht als einen gequantelten Prozess zu betrachten.¹¹

11 »In diesem Zusammenhang möchten wir auf ein von Planck und seinen Kollegen unterzeichnetes Schreiben hinweisen, mit dem die Aufnahme Einsteins in die Preußische Akademie der Wissenschaften empfohlen wurde. Nach der Aufzählung von Einsteins wissenschaftlichen Verdiensten wird gleichsam entschuldigend hinzugefügt, daß ein gelegentliches Hinausschießen über das Ziel, wie z. B. Einsteins Hypothese der Lichtquanten, bei jedem einmal vorkommen kann. Beinahe ein Jahrzehnt später, im Jahr 1921, hat Einstein den Nobelpreis in erster Linie für diese Arbeit erhalten.

Auch zur Beseitigung der Diskrepanz zwischen Theorie und Experiment

Albert Einstein hatte sich 1905 intensiver mit dem photoelektrischen Effekt beschäftigt, dem etwa auch die Funktionsweise der Fotosensoren in unseren Digitalkameras zugrunde liegt. Sein besonderes Interesse erregte der Befund, dass der Austritt von Elektronen einer bestimmten Energie nicht von der Menge des eintreffenden Lichts, sondern von der Farbe, also seiner Frequenz abhängt. Eine höhere Lichtintensität kann zwar die Zahl der emittierten Elektronen erhöhen, bestimmt aber nicht, ob überhaupt ein Elektron einer bestimmten Energie aus dem Verband rausgeschlagen werden kann. Dies ist nur möglich, indem ein hinreichend kurzwelliges Licht einstrahlt. Da sich der Energiegehalt von Licht als umgekehrt proportional zu seiner Wellenlänge zeigt, entwickelte Einstein schließlich seine revolutionäre Idee, dass auch elektromagnetische Wellen als aus diskreten Energiepaketen bestehend zu beschreiben sind. Die Eigenschaften von Licht – so die entscheidende Schlussfolgerung – lassen sich also nur erklären, wenn man Licht sowohl Wellen- als auch Teilchennatur zugesteht. 1921 hat Einstein für die Arbeiten,¹² in der diese Gedanken ausformuliert wurden, den Nobelpreis erhalten.

Die sich mit Einstein abzeichnenden ersten Ansätze einer ›Quantentheorie‹ öffneten neue Perspektiven für die Atomphysik. Das Rutherford'sche Atommodell, entsprechend dem die negativ geladenen Elektronen, homolog der Planetenbewegung, um einen positiv geladenen Atomkern kreisen, hatte zunächst zwar eine bestechende Plausibilität. Es krankte jedoch daran, dass die Elektronen entsprechend der Theorie des Elektromagnetismus ihre Energie abstrahlen würden und entsprechend innerhalb kürzester Zeit in den Kern fallen müssten. Demgegenüber erwies sich die These von Niels Bohr, dass nur bestimmte Elektronenbahnen erlaubt seien, also jeweils nur bestimmte Energieniveaus eingenommen werden können, nicht nur theoretisch, sondern auch empirisch als plausibel. Wenn angeregte Atome Licht aussenden, dann zeigen sich nur bestimmte Farben und zwar in diskreten, begrenzten Spektralbändern, so dass auch hier eine quantentheoretische Beschreibung erfolgversprechend schien.

Die Idee, die konventionelle Auffassung der Zuordnung von Wellen- und Teilcheneigenschaften zu durchkreuzen, bekam wenige Jahre später von einer anderen Seite Nahrung: 1923 schlug Louis de Broglie in seiner Doktorarbeit vor, auch Materie als Wellen aufzufassen.¹³ Beispielsweise könnte man Elektronen als ›stehende Wellen‹ beschreiben, die um das Zentrum eines Atoms laufen. Wie bei jeder Welle können dann nur ganzzahlige Vielfache der Wellenlänge als Umfang

im Falle der spezifischen Wärme fester Körper hat Einstein als erster 1906 die Quantenhypothese benutzt. Einsteins Theorie wurde später von Debye verbessert« (Simonyi 2004, 435).

¹² Siehe vor allem Einstein (1905).

¹³ Siehe de Broglie (1924).

der Bahn angenommen werden, da sich die Welle ansonsten durch Interferenzen selbst auslöschen würde. Die verschiedenen möglichen Bahnen würden sich dann durch unterschiedliche Energieniveaus auszeichnen, was dann wiederum der Quantenhypothese entspräche.

Wir treffen in Bezug auf die subatomaren Verhältnisse nun einerseits auf ein Teilchenmodell, mit dem sich etwa die gequantele Absorption und Emission von elektromagnetischer Strahlung in diskreten Einheiten begreifen lässt. Andererseits hat jedoch das Wellenmodell weiterhin seine Plausibilität, denn mit ihm lässt sich etwa das Verhalten von Wasserstoff- oder Heliumatomen recht gut beschreiben.

Während Planck sich seinem Problem noch durch eine einfache mathematische Interpolation nähern konnte, lassen sich diese beiden Beschreibungsweisen nicht so leicht in eine Formel überführen. Ebenso fehlte eine physikalische Erklärung des Welle-Teilchen-Dualismus. Die Eigenschaften von Wellen sind nicht mit denen von Teilchen in Übereinstimmung zu bringen. Wellen interferieren – Wellenberge und Wellentäler heben einander auf. Bei Teilchen ergibt der Begriff der Interferenz keinen physikalischen Sinn.

Nirgends wird das sich hiermit ergebende Dilemma inkommensurabler Beschreibungen so deutlich wie im so genannten Doppelspaltexperiment, denn hier treffen wir auf einen empirischen Sachverhalt, in dem das theoretische Problem der Beziehung zwischen diesen beiden Beschreibungsweisen unhintergehbar wird. Gehen wir deshalb im Folgenden etwas ausführlicher auf das Doppelspaltexperiment ein, um das Bezugsproblem, mit dem die physikalische Theoriebildung in den 20er-Jahren des letzten Jahrhunderts konfrontiert war, besser nachvollziehen zu können.¹⁵

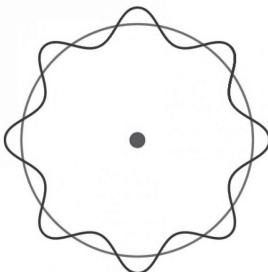


Abb. 2: Elektronenbahn als stehende Welle¹⁴

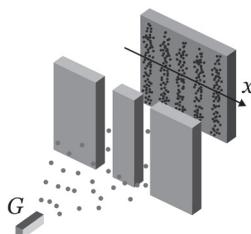


Abb. 3: Doppelspaltexperiment¹⁵

¹⁴ Quelle: Tobias Krähling. Download am 13.4.2011 unter: <http://www.semibyte.de/wp/graphicslibrary/gl-physics/elektronenbahn-als-stehende-welle/>

¹⁵ Quelle: [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/bc/Doubleslitexperiment.svg/220px-Doubleslitexperiment.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/bc/Doubleslitexperiment.svg/220px-Doubleslitexperiment.svg.png) (download 13.7.2012).

Lassen wir Licht von einer punktförmigen Lichtquelle auf eine Wand treffen, die eine kleine Spaltöffnung hat, so tritt ein wenig des Lichts durch die Öffnung hindurch. Auf der anderen Seite kann man das Licht in Form eines Balkens auf einem entsprechenden Schirm sehen bzw. bei schwachen Lichtstärken mit entsprechend empfindlichen Sensoren nachweisen. Wenn der Spalt hinreichend schmal ist, bildet der Balken an den Rändern jedoch keine scharfen Kanten aus. Vielmehr erscheint ein unscharfer Übergang. Das Licht – so die zunächst plausible anschauliche Deutung – scheint am Rand des Spalts gestreut zu werden, weshalb die Übergänge dann auf dem Schirm verschwommen erscheinen. Man kann die Strahlung der Lichtquelle nun soweit herunterfahren, dass sich die ›Lichtteilchen‹ beim Auftreffen jeweils einzeln verfolgen lassen. Jetzt zeigen sich auf dem Schirm jeweils punktförmige Ereignisse, deren Orte jedoch im Rahmen des unscharfen Balkens verteilt sind. Zählt man eine Vielzahl solcher Ereignisse aus, so ergibt sich für ihre Häufigkeitsverteilung wieder das Balkenmuster. Anschaulich könnte man dieses Ergebnis nun so deuten, dass das Licht eben aus Teilchen bestehe, die, falls sie die Spaltwand berühren, ein wenig abgelenkt werden, deshalb etwas von ihrer Bahn abgebracht werden und so das Streubild erzeugen.

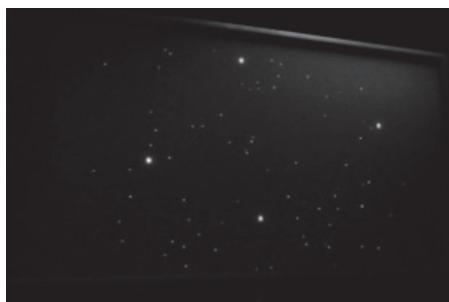


Abb. 4: Schirm beim Experiment ohne Spalt. Die einzelnen Ereignisse streuen auf dem ganzen Schirm¹⁶

Wenn wir aber jetzt einen Doppelspalt verwenden, ändern sich die Verhältnisse. Das Licht kann nun durch beide Spaltöffnungen hindurchtreten. Entsprechend dem Teilchenmodell würden wir nun erwarten, dass ein einzelnes Lichtquant entweder durch den einen oder den anderen Spalt tritt. Auf dem Schirm würden wir dann für jeden

¹⁶ Dieses und die folgenden Videogramme entstammen der Dokumentation »Das geheimnisvolle Reich der Quanten«, erstellt von Gerald Kargl GesmbH Filmproduktion Wien im Auftrag des Bundesministeriums für Unterricht, Kunst und Kultur, Wien und FWU, München, vertrieben von Komplett-Media GmbH München, <http://www.komplett-media.de> und <http://www.fwu.de>. Kargl, Gerald GmbH (2006). Das geheimnisvolle Reich der Quanten. Komplett Video.

Spalt ein Balkenmuster sehen, das dann wiederum an den Grenzen unscharf erscheint. Für das Gesamtbild des Doppelspaltexperiments würden wir entsprechend vermuten, dass sich diese beiden Bilder addieren, denn entsprechend dem Teilchenmodell ist davon auszugehen, dass wir es weiterhin mit streuenden Einzelereignissen zu tun haben, die unabhängig voneinander durch die beiden Spalten treten.



Abb. 5 & 6: Schirm beim Experiment mit einem Spalt. Die einzelnen Ereignisse streuen im Bereich eines Balkens mit unscharfen Grenzen

Das reale Experiment offenbart demgegenüber ein anderes Ergebnis: Wir finden ein Interferenzmuster vor, dass dem Erscheinungsbild nach an Wellen erinnert, die sich überlagern. Die Wellenbewegung oszilliert zwischen einem Maximum und einem Minimum. Wenn zwei Wellen aufeinandertreffen, addieren sich die Wellenberge, während die Wellentäler doppelt so tief erscheinen. Wellenberg und Wellental löschen sich demgegenüber einander subtrahierend aus. Eine homologe Beziehung können wir beim Doppelspaltexperiment beobachten. Wir finden jetzt auf dem Schirm ein Streifenmuster vor, indem sich helle und schwarze Streifen periodisch und in kontinuierlichen Übergängen abwechseln. In der anschaulichen Deutung scheinen wir es hier also mit Wellen aus Licht zu tun zu haben, die gleichzeitig durch beide Spalten gehen und auf der anderen Seite als zwei interferierende Wellen auf dem Schirm das beobachtete Muster generieren.

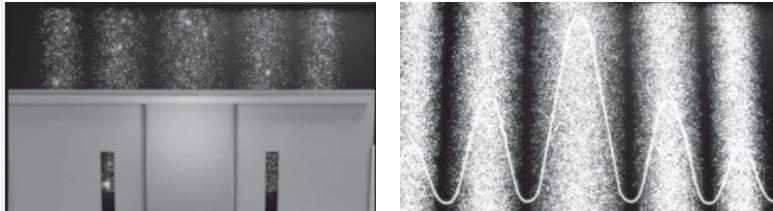


Abb. 7 und 8: Schirm beim Doppelspaltexperiment. Hinsichtlich der Verteilung zeigen sich Maxima mit hoher Intensität sowie Streifen, an denen keine Ereignisse anzutreffen sind.

Wenn man die Lichtquelle jetzt wieder so weit herunterfährt, dass sich Einzelereignisse beobachten lassen, zeigen sich auf dem Schirm wiederum nur punktförmige Ereignisse. Zählt man jedoch wiederum eine große Menge dieser Ereignisse aus, ergibt sich für ihre Häufigkeitsverteilung erneut das Wellenmuster. Dieser Befund ist verwirrend, denn warum bilden aufeinanderfolgende diskrete Ereignisse in ihrer Häufung ein Wellenmuster? Sind die Einzelereignisse auf irgendeine Weise miteinander kausal verbunden? Eine Welle müsste durch beide Spalten gehen, aber auf dem Schirm sehen wir jeweils nur Punkt Ereignisse, aus denen das Gesamtbild zusammengesetzt wird.

Man kann das Experiment jetzt so abwandeln, dass man hinter jeder Spaltöffnung jeweils einen Detektor anbringt, mit dem sich feststellen lässt, ob ein Lichtquant hindurchgegangen ist. Hier zeigt sich nun der Befund, dass entweder an dem einem oder dem anderen Spalt ein Ereignis detektiert werden kann. Die Bestimmung führt jedoch merkwürdigerweise zu der Konsequenz, dass nun kein Interferenzmuster mehr auf dem Schirm erscheint. Die Auszählung der Ereignisse führt jetzt zu einer Häufigkeitsverteilung, die der Addition von zwei Einzelpaltexperimenten entspricht. Man hat nun weiterhin zwei Spaltöffnungen, doch die Tatsache der Messung des Orts, an dem das Licht durchtritt, bringt das Wellenmuster zum Verschwinden. Spätestens jetzt erscheinen die Verhältnisse vollkommen bizarr. Wie kann es sein, dass die Frage, ob der Weg bestimmt wird, mitentscheidet, ob eine Wellenbeziehung auftritt oder nicht?

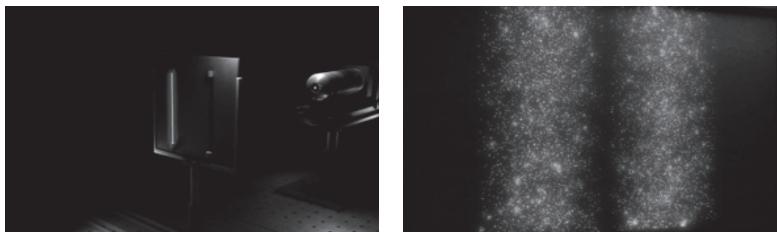


Abb. 9 und 10. Doppelspaltexperiment mit Messung. Ein Detektor ermittelt die Weginformation. Hiermit verschwindet jedoch das Interferenzbild und man erhält zwei Balkenverteilungen, die der Summe zweier getrennter Einzelpaltexperimente entsprechen würden.

Diese Experimente lassen sich in verschiedener Form variieren. Anstelle von sichtbarem Licht kann man es mit Elektronen oder sogar mit geeigneten größeren Molekülen durchführen (etwa mit den Fullererenen¹⁷⁾). Man kann sicherstellen, dass die Detektoren für die Weg-

¹⁷ Fullerene sind sphärische ›Fußballmoleküle‹, die aus einer Kugeloberfläche von Kohlenstoffatomen bestehen, die aus regelmäßigen Fünf- und

information so empfindlich sind, dass sie mit ihrer Messung von der Gesamtenergie des Ereignisses nur einen geringen Betrag abzwacken. All dies verändert jedoch nicht den sonderbaren Befund, dass sich ohne die Erhebung der Information hinsichtlich des genommenen Weges das Interferenzmuster zeigt, sobald aber der Weg bestimmt wird, die Wellencharakteristik verschwindet.

Gerade das Doppelspaltexperiment lässt das Bezugsproblem deutlich werden, vor dem die theoretische Physik in den 20er-Jahren stand. Die Beschreibungsweisen der klassischen Physik, sei es in Form von Teilchen oder (elektromagnetischen) Wellen sind jetzt nicht mehr hinreichend, um die Verhältnisse in der subatomaren Welt angemessen beschreiben, geschweige denn erklären zu können.

Insbesondere Albert Einstein hat mit seinem Genius schnell begriffen, dass die hiermit aufgeworfenen Fragen nicht mehr mit den Eigenmitteln der klassischen Physik zu lösen sind. Gehen wir im Folgenden etwas ausführlicher auf seinen Aufsatz »Über die Krise der gegenwärtigen Physik« aus dem Jahre 1922 ein, um die Problemlagen besser nachvollziehen zu können, die im Vorfeld der Entwicklung der modernen Quantentheorie bestanden.

Einstein hatte mit der Formulierung der allgemeinen Relativitätstheorie gezeigt, dass Neuerungen der Physik immer auch mit veränderten Anschauungen verbunden sind. Sobald man die Grundideen der von Faraday und Maxwell begründeten Feldtheorie auf die Gravitation überträgt – und dies hatte er in seinen Gedankenexperimenten vorweggenommen, zeigt sich, dass Geraden, Flächen und Räume gekrümmt sein können. Das Ergebnis war ein Paradigmenwechsel in der Physik: »Mit der allgemeinen Relativitätstheorie sank eine Stütze der Newtonschen Theorie dahin, von der man ehedem geglaubt hatte, daß sie zum Fundament jeglicher Naturwissenschaft mit Notwendigkeit gehöre, nämlich die Euklidische Geometrie.¹⁸ Über die Äquivalenzbeziehung von »Trägheit und Energie« gelang es Einstein jedoch, die klassische Physik auf Basis einer nichteuklidischen Geometrie zu rekonsolidieren und erneut in ein geschlossenes theoretisches Gebilde zu überführen.

Demgegenüber waren jedoch die Experimente zur Emission und Absorption von Licht nicht mehr in Übereinstimmung mit der hiermit formulierten Theorieanlage zu bringen:

»In den letzten zwei Jahrzehnten ist erkannt worden, daß auch das durch die Faraday-Maxwellsche Feldtheorie charakterisierte

Sechsecken zusammengesetzt sind. Die Doppelspaltexperimente sind in der Arbeitsgruppe um Anton Zeilinger mit C₆₀-Fullerenen durchgeführt worden (Arndt, et al. 1999).

¹⁸ Einstein (1922, 234).

Fundament der Physik der Erfahrung gegenüber nicht stand hält, so wenig wie die von ihr begründete Mechanik. Es ist vielmehr zu erwarten, daß der Fortschritt der Wissenschaft eine Änderung ihres Fundaments verlangt, welche nicht minder tiefgreifend ist als diejenige, welche wir unter dem Namen ›Feldtheorie‹ zusammengefasst haben. Da wir aber noch weit von einem logisch klaren Fundament entfernt sind, müssen wir uns hier damit begnügen zu zeigen, inwiefern die bisherige Grundlage sich als unzureichend erweist, und wie man durch erfolgreiche, aber doch nur tastende Versuche, die durch den Namen ›Quantentheorie‹ zusammengefaßt sind, wichtigen Gruppen physikalischer Erscheinungen gerecht geworden ist«.¹⁹

Wie in der Schilderung des Doppelspaltexperiments bereits angedeutet, begegnen wir hier zwei Beschreibungsebenen, die nicht ineinander überführt werden können. Zum einen treffen wir auf eine Teilchentheorie, welche nicht mit den beobachteten Beugungs- und Interferenzphänomenen in Einklang zu bringen ist. Zum anderen begegnen wir einer Wellenbeschreibung, die zwar einige Aspekte der Experimente erklären, dann aber nicht mit den gequantelten Verhältnissen beim Energietransfer verbunden werden kann:

»Die Lichtabsorption besteht in unteilbaren Elementarprozessen, bei deren jedem die Energie $h\nu$ vollständig umgesetzt wird. Über die Einzelheiten eines solchen Elementarprozesses wissen wir nichts. Wären von der Strahlung nur ihre energetischen Eigenschaften bekannt, so würden wir uns genötigt sehen, eine Art molekulare Theorie der Strahlung aufzustellen nach Art der Newtonschen Emissionstheorie des Lichtes. Aber die Erklärung der Beugungs- und Interferenz-Vorgänge auf solcher Basis stößt auf unüberwindliche Schwierigkeiten. Es ist ferner wahrscheinlich daran festzuhalten, daß die Feldtheorie der Strahlung nicht in höherem Maße falsch ist als die Theorie der elastischen Wellen in festen Körpern, welche deren thermischen Inhalt konstituieren; denn beide Theorien kollidieren in gleichen Maße mit der Quantenrelation und müssen in gleicher Weise mit letzterer kombiniert werden, um zu einer zutreffenden Deutung der Erfahrungsresultate zu gelangen.«²⁰

Aus der Anforderung, die Quantenrelation mit einer Wellentheorie verbinden zu müssen, ergibt sich mit Einstein nun die Konsequenz, dass die hieraus resultierende Physik nicht mehr (nur) auf Differen-

19 Ebd., 234 f.

20 Ebd., 237.

zialgleichungen beruhen kann. Das bereits von Newton entwickelte System, die Physik auf der Basis einer Kombination von sich kontinuierlich veränderten Energien, Impulsen und Raumkoordinaten zu beschreiben, funktioniert hier nicht mehr. Während man beispielsweise die Schwingung einer Seite oder eines Pendels als ein Wechselspiel sich aufeinander beziehender, ortsabhängiger Veränderungen der potentiellen und der kinetischen Energie beschreiben kann, gilt dies nicht mehr für die ›gequantelten‹ Verhältnisse. Hierfür ist – so Einsteins Vermutung – eine andere, nichtklassische Beschreibungsweise nötig:

»Es ist vielfach bemerkt worden, daß bei dem heutigen Zustande unserer Kenntnis die Darstellbarkeit der Naturgesetze durch Differenzialgleichungen zweifelhaft erscheint. In der That müssen wir nach der soeben angegebenen Quantenregel einen ganzen Bewegungszyklus des Systems ins Auge fassen, um beurteilen zu können, ob ein bestimmter Zustand des Systems quantentheoretisch erlaubt ist oder nicht. Um den Quanten-Relationen wirklich gerecht zu werden, scheint eine neue mathematische Sprache nötig zu sein; jedenfalls erscheint es sinnwidrig die Gesetze durch Kombination von Differentialgesetzen und Integralbedingungen auszudrücken, wie wir es heute thun [sic]. Abermals sind die Grundlagen der Physik erschüttert, und es ruft die Erfahrung nach dem Ausdruck einer höheren Stufe von Gesetzlichkeit. Wann wird uns der erlösende Gedanke beschert werden? Glücklich diejenigen, welche es erleben und schauen dürfen?«²¹

Wenn aber nun die beobachteten Verhältnisse nicht mehr mittels auf Differenzialrechnung beruhenden Bewegungsgleichungen rekonstruiert werden können, dann muss entweder die Idee des Determinismus und damit verbunden die starke Fassung des Kausalitätsgesetzes oder ein anderer wichtiger Satz der klassischen Physik – etwa das Gesetz der Energieerhaltung – aufgegeben werden.²²

²¹ Ebd., 238 f.

²² Wohlgemerkt: Eine klassische Beschreibung beinhaltet nicht, dass man einen Weltzustand auch ausrechnen können muss. In rekursiven Verhältnissen können minimale Schwankungen in den Anfangsbedingungen riesige Auswirkungen auf den Systemzustand haben. Prinzipiell bleibt aber der Verlauf dennoch mittels der klassischen Differenzialgleichungen modellierbar. So handelt es sich etwa beim deterministischen Chaos immer noch um Prozesse, die gut durch die Newtonschen Bewegungsgleichungen beschrieben werden können. Siehe zur Einführung in die Chaostheorie etwa Broer und Takens (2011).

Einstiens Ausführungen aus dem Jahre 1922 legen deutlich die Bezugssprobleme dar, vor denen die theoretische Physik der 20er-Jahre stand und für die dann wenige Jahre später mit Heisenbergs Matrizenmechanik und der Schrödinger-Gleichung erstmalig Antworten gefunden wurden.

In seiner wissenssoziologischen Studie zum Einfluss der Weimarer Kultur auf die Physik hat Forman (1971) Einstiens Beitrag reichlich missverstanden. Dass die Physiker damals begannen, öffentlich darüber nachzudenken, ob unter Umständen das Kausalitätsprinzip einzuschränken sei, hat nichts mit der Anpassung an physikfeindliche Ideologien und profaschistische Geistesströmungen zu tun. Einstein antwortet nicht auf eine gesellschaftliche Krise, sondern auf die theoretischen und experimentellen Lagerungen der durch die Physik selbst generierten Problemstellungen. Die zunehmende Bereitschaft, fundamentale Konzepte der Physik infrage zu stellen, war vor allem eine Konsequenz der sich immer deutlicher offenbarenden Risse und Widersprüche innerhalb der physikalischen Theorie- und Begriffsbildung. Mathematische Modellierung, Experiment und physikalische Anschauung ließen sich nicht mehr in eine kohärente Form bringen.

In dieser Zeit suchte praktisch die gesamte Elite der theoretischen Physik intensiv nach neuen Lösungswegen. Wichtige Zentren der theoretischen Auseinandersetzung waren dabei insbesondere München mit Arnold Sommerfeld, Göttingen mit Max Born, Kopenhagen mit Niels Bohr sowie Berlin, wo Max Planck und Albert Einstein arbeiteten.

Heisenbergs Lösung: Verzicht auf das Konzept der Elektronenbahn

Der entscheidende Durchbruch zur Quantentheorie gelang Werner Heisenberg mit der Formulierung der Matrizenmechanik. Der außergewöhnliche Schritt in seiner Theoriebildung bestand darin, sich von der Vorstellung des Bohrschen Atommodells radikal zu lösen, um stattdessen einen abstrakten Zugang zu suchen, der auf die Anschauung der Elektronenbahn vollkommen verzichten kann. Wie revolutionär diese Idee war, wird deutlich an dem folgenden Dialog mit Einstein, den Heisenberg später in seinen biografischen Notizen rekapituliert hat:

»Was Sie uns da erzählt haben, klingt ja ungewöhnlich. Sie nehmen an, daß es Elektronen im Atom gibt, und darin werden Sie sicher recht haben. Aber die Bahnen der Elektronen im Atom, die wollen Sie ganz abschaffen, obwohl man doch die Bahnen

der Elektronen in einer Nebelkammer unmittelbar sehen kann. Können Sie mir die Gründe für diese merkwürdigen Annahmen etwas genauer erklären?«

›Die Bahnen der Elektronen im Atom kann man nicht beobachten, habe ich wohl erwidert, ›aber aus der Strahlung, die von einem Atom bei einem Entladungsvorgang ausgesandt wird, kann man doch unmittelbar auf die Schwingungsfrequenzen und die dazu gehörigen Amplituden der Elektronen im Atom schließen. Die Kenntnis der Gesamtheit der Schwingungszahlen und der Amplituden ist doch auch in der bisherigen Physik so etwas wie ein Ersatz für die Kenntnis der Elektronenlaufbahnen. Da es aber doch vernünftig ist, in eine Theorie nur Größen aufzunehmen, die beobachtet werden können, schien es mir naturgemäß, nur diese Gesamtheiten, sozusagen als Repräsentanten der Elektronenbahnen, einzuführen.‹

›Aber Sie glauben doch nicht im Ernst, entgegnete Einstein, ›daß man in eine physikalische Theorie nur beobachtbare Größen aufnehmen kann. [...] Dann müssen Sie aber auch sagen: In der Nebelkammer beobachten wir die Bahn eines Elektrons durch die Kammer. Im Atom soll es nach Ihrer Ansicht keine Bahnen des Elektrons mehr geben. Das ist doch offenbar Unsinn. Einfach durch die Verkleinerung des Raumes, in dem das Elektron sich bewegt, kann doch der Bahnbegriff nicht außer Kraft gesetzt werden.‹

Ich mußte nun versuchen, die neue Quantenmechanik zu verteidigen. ›Einstweilen wissen wir noch gar nicht, in welcher Sprache wir über das Geschehen in Atomen reden können. Wir haben zwar eine mathematische Sprache, das heißt ein mathematisches Schema, mit Hilfe dessen wir die stationären Zustände des Atoms oder Übergangswahrscheinlichkeiten von einem Zustand in den anderen ausrechnen können. Aber wir wissen noch nicht – wenigstens noch nicht allgemein – wie diese Sprache mit der gewöhnlichen Sprache zusammenhängt. [...] Ich kann nicht behaupten, daß wir die Quantenmechanik schon verstanden hätten. Ich vermute, daß das mathematische Schema schon in Ordnung ist, aber der Zusammenhang mit der gewöhnlichen Sprache ist noch nicht hergestellt.‹«²³

²³ Aus Heisenberg (2010, 74 ff.) Kap. 5 »Die Quantenmechanik und ein Gespräch mit Einstein«.

Heisenbergs Grundidee bestand darin, eine abstrakte relationale Dynamik zu entwickeln, die nur auf den jeweiligen Sets der beobachtbaren Größen beruht und auf konzeptionelle Vorstellungen wie Elektronenbahnen und Elektronenteilchen verzichten kann. Seine Vorgehensweise war dabei folgende: Messbare Frequenzen, v_a , v_b etc., treten beim Übergang von Zustand m in den Zustand n auf. Nun kann man eine Matrix erstellen, die für alle möglichen m und n die unterschiedlichen, jeweils beobachtbaren Frequenzen abbildet. Eine Matrix stellt im Prinzip eine Kreuztabelle dar, welche entsprechend bestimmter mathematischer Gesetzmäßigkeiten mit einer anderen Matrix verrechnet werden kann (»Matrizenrechnung«). Ebenso kann man nun für alle n, m Kombinationen eine Matrix für den Bewegungszustand p (den Impuls) und eine für die Lage q (die Ortskoordinate) bilden. Auf diese Weise erhält man eine hoch abstrakte Beschreibungsform mikrophysikalischer Prozesse, die – so Heisenbergs Hoffnung – auch physikalisch Sinn ergibt und mit der man in die Lage kommt, Quantenprozesse angemessen zu beschreiben und vorherzusagen.

Der hiermit formulierte Ansatz war für die damalige Physik revolutionär, denn er ging aus einer Mathematik hervor, die auf keinerlei physikalischer Anschauung mehr beruhte, sondern per se auf Abstraktion setzte.

Heisenbergs Vorgehensweise wird oft als eine rein positivistische betrachtet. Dies ist jedoch eine verkürzte Perspektive auf die Art und Weise seiner Theoriebildung. De facto ist sein Vorgehen nicht nur durch Daten und deren Mathematisierung, sondern zugleich hochgradig durch theoretische und – man ist geneigt zu sagen – auch weltanschauliche Konzepte geleitet. So verzichtet er nur auf bestimmte gegenstandsbezogene Anschauungen, möchte dabei aber nicht alle physikalischen Konzepte aufgeben, sondern lässt sich vielmehr durch die Intuition leiten, dass das Gesetz der Energieerhaltung weiterhin zu gelten habe. Zudem spielen ästhetische Kriterien offensichtlich für ihn eine wichtige Rolle:

»[...] In einigen weiteren Tagen wurde mir klar, was in einer solchen Physik, in der nur die beobachtbaren Größen eine Rolle spielen sollten, an die Stelle der [alten] Quantenbedingungen zu treten hätte. Es war auch deutlich zu spüren, daß mit dieser Zusatzbedingung ein zentraler Punkt der Theorie formuliert war, daß von da ab keine weitere Freiheit mehr blieb. Dann aber bemerkte ich, daß es ja keine Gewähr dafür gäbe, daß das so entstehende mathematische Schema überhaupt widerspruchsfrei durchgeführt werden könnte. Insbesondere war es völlig ungewiß, ob in diesem Schema der Erhaltungssatz der Energie noch gelte, und ich durfte mir nicht verheimlichen, daß ohne den Energiesatz

das ganze Schema wertlos wäre. Andererseits gab es in meinen Rechnungen inzwischen auch viele Hinweise darauf, daß die mir vorschwebende Mathematik wirklich widerspruchsfrei und konsistent entwickelt werden könnte, wenn man den Energiesatz in ihr nachweisen könnte. [...] Der Energiesatz hatte sich in allen Gliedern als gültig erwiesen, – und da dies ja alles von selbst, sozusagen ohne jeden Zwang herausgekommen war – so konnte ich an der mathematischen Widerspruchsfreiheit und Geschlossenheit der damit angedeuteten Quantenmechanik nicht mehr zweifeln. Im ersten Augenblick war ich zutiefst erschrocken. Ich hatte das Gefühl, durch die Oberfläche der atomaren Erscheinungen hindurch auf einen tief darunter liegenden Grund von merkwürdiger innerer Schönheit zu schauen, und es wurde mir fast schwindelig bei dem Gedanken, daß ich nun dieser Fülle von mathematischen Strukturen nachgehen sollte, die die Natur dort unten vor mir ausgebreitet hatte.«²⁴

Experiment und mathematische Formen finden hier in neuen, für den theoretischen Physiker faszinierenden Rekombinationen zusammen, die zunächst noch fern jeglicher physikalischer Anschauung stehen. Mit Hilfe der mathematischen Unterstützung von Max Born und Pascual Jordan gelang Heisenberg schließlich eine überzeugende Formulierung der Matrizenmechanik.

Damit war die Quantenmechanik geboren und von nun an ließen sich ihre Besonderheiten untersuchen. Man konnte nun einen Teil der klassischen Physik hinter sich lassen und doch zugleich in dem Sinne weitermachen, als dass Mathematik und Experiment weiterhin in einer engen Wechselbeziehung stehen. In diesem Sinne kann hier in der Tat mit Kuhn von einem Paradigmenwechsel gesprochen werden, denn die Theoriebildung folgt von nun an anderen Pfaden. Die Quantenmechanik vollzieht in diesem Sinne zugleich eine Öffnung wie auch eine Schließung der Physik. Sie eröffnet neue Perspektiven auf die Welt. Ihr Formalismus legt jedoch aufgrund interner Konsistenzzwänge die Physik wiederum auf vorformatierte Pfade fest.²⁵

²⁴ Heisenberg, hier zitiert nach Fischer (2008, 81 f.).

²⁵ Siehe hierzu auch Fischer: »Damit kann er den mathematischen Ballast abwerfen, der das Erbe der alten Physik darstellt. Hier vollzieht sich, was man emphatisch eine Reinigung nennen könnte, und Heisenberg läßt sich Zeit mit ihr, um sie gründlich zu machen. Daß er sich am Ende dieser befreienden Anstrengung in einer Lage wiederfindet, in der ihm ›keine weitere Freiheit mehr blieb‹, wie er schreibt, verwirrt zwar den rationalen Wissenschaftler, nicht aber den kreativen Künstler, als den wir Heisenberg ansehen müssen. Was jetzt festliegt, ist die Form, der sich jeder Künstler unterwirft, etwa die Sonatenform in der Musik oder das

Die mit Quantenmechanik eingeführte Matrizenrechnung bringt eine besondere Eigenart mit sich. Bei der Multiplikation der Matrizen ergibt sich, dass die Reihenfolge der Faktoren, mit denen die Rechnung ausgeführt wird, für das Ergebnis von Bedeutung ist. Die Matrizenprodukte für die Impuls- und Ortsmatrizen pq und qp stimmen nicht überein, sondern zeigen eine ›Vertauschungsrelation‹, die im Falle des Formalismus der Quantentheorie durch die Gleichung

$$\text{»}pq - qp = h/2\pi i1\text{«}^{26}$$

ausgedrückt werden kann. Die Gleichung findet ihren klassischen Grenzfall für alle Fälle, in denen die beiden Produkte pq und qp praktisch so groß sind, dass das Planck'sche Wirkungsquantum h im Verhältnis zu diesen Beträgen verschwindend klein erscheint. Der von Heisenberg entdeckte Formalismus führt über die Vertauschungsrelation auf die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation, entsprechend der Ort und Impuls nicht beide genau bestimmt werden können. Hierauf wird später noch ausführlicher eingegangen. Wir sehen an dieser Stelle aber schon, dass aus der Mathematik der Quantenmechanik eine Reihe von Konsequenzen folgen, die dann ihrerseits nach einer physikalischen Interpretation verlangen.

Der Verzicht auf das klassische Konzept der Elektronenbahnen mündet hier zwar in einen erfolgreichen Formalismus, der experimentelle Daten erklären kann. Damit verbunden ist jedoch ein Verlust an physikalischer Anschauung, der als Bezugsproblem die Frage aufwirft, durch welches physikalische Konzept die hiermit entstandene Lücke geschlossen werden kann. Das Problem der physikalischen Deutung und Interpretation der Quantentheorie ist somit eröffnet. Wenn klassische Anschauungen, die sich aus lebensweltlichen Erfahrungen und Beobachtungen speisen, nicht mehr tragen, was soll dann an deren Stelle gesetzt werden?

Schrödingers Wellengleichungen: Wellen aus nichts?

Kommen wir mit der Schrödinger-Gleichung zum nächsten zentralen Schritt in der Entwicklung der Quantentheorie. Wir hatten zuvor bereits auf die Broglies Idee hingewiesen, Elektronen als Materiewellen zu beschreiben, die als stehende Wellen um den Atomkern herum-

Bildformat in der Malerei. Die Freiheit der Kunst ist keine Beliebigkeit, sondern der Rahmen, in dem sich Kreativität zeigen kann« (Fischer 2008, 81 f.). Vgl. zum konstituierenden Wechselspiel von Öffnung und Schließung aus gesellschaftstheoretischer Perspektive auch Nassehi (2003).

²⁶ Simonyi (2004, 441).

laufen. Schrödinger griff diesen Ansatz mit seiner Wellenfunktion auf und erweiterte ihn, um das Problem der Quantisierung anzugehen. Er wollte auf diesem Wege von der abstrakten Matrizenmechanik wegkommen, um wieder eine Modellierung zu gewinnen, die auch physikalisch-anschaulich Sinn ergibt.

Diese Herausforderung erschien ihm als ein einfach zu bewältigendes mathematisches Problem, nämlich als die Aufgabe, Eigenwerte und Eigenfunktionen zu bestimmen. Eigenwerte sind Lösungen, bei denen der Wert, der in die Funktion eingesetzt wird, gleich dem Ergebnis ist, dass sich aus der Anwendung der Funktion ergibt. Man kann nun auch Funktionen auf Funktionen anwenden – in der Mathematik spricht man hier von einem Operator – und nach den Eigenfunktionen suchen, die bei der Anwendung auf sich selbst erhalten bleiben und dabei mit bestimmten numerischen Werten – den Eigenwerten dieser Eigenfunktion – multipliziert werden können. Anschaulich können wir uns das etwa an der Schwingung einer Saite vorstellen.

Der Funktionszusammenhang, welcher der Saitenschwingung zugrunde liegt, führt zu einer Eigenfunktion – eben einer Sinusschwingung, die jedoch in verschiedenen Obertönen schwingen kann. Die Saite kann die Grundschwingung, die Oktave, aber auch die dreifache, vierfache, fünffache etc. Frequenz der Grundschwingung einnehmen. Jede mögliche Schwingungsform stellt einen Eigenwert der jeweiligen Saite dar.

Eigenwerte und Eigenfunktionen sind also Lösungen einer bestimmten Problemstellung, die sich aus der Selbstbezüglichkeit der Operatoranwendung ergibt. Eigenfunktionen lassen sich auch für Ableitungen finden, also für Funktionsbeziehungen, welche die Änderungen einer Funktionsbeziehung beschreiben. Beispielsweise lässt sich die Steigung der Exponentialfunktion e^x wiederum durch die Beziehung e^x abbilden.

Im Prinzip reicht das Verständnis der vorangehenden Ausführungen aus, um die Grundintuition der Schrödinger-Gleichung nachvollziehen zu können: Die gequantelten Verhältnisse der nun als Wellen zu beschreibenden subatomaren Prozesse werden als ein Eigenwertproblem aufgefasst.²⁷

Die beobachteten Quantenzustände entsprechen dann den erlaubten Eigenwerten der Eigenfunktionen der das System beschreibenden Operatoren. Umgekehrt formuliert: Wir haben den Hamilton-Operator H , der die Gesamtenergie eines Systems beschreibt. Dieser

²⁷ So dann auch der Titel von Schrödingers berühmter Originalarbeit »Quantisierung als Eigenwertproblem«, die 1926 in vier Mitteilungen in den ›Annalen der Physik‹ erschienen ist.

setzt sich aus einem Term für die kinetische Energie und einem für die potentielle Energie zusammen. In beide geht jeweils eine Wellenfunktion ein, für welche sich Eigenwerte finden lassen, die mögliche Quantenzustände darstellen.

In einer einfachen, zeitunabhängigen Form lässt sich die Schrödinger-Gleichung in Bezug auf die Ortskoordinate folgendermaßen darstellen:²⁸

$$(-\hbar^2/2m) \Delta\psi(x) + V(x) \psi(x) = H \psi(x),$$

Die Faktoren \hbar und m beziehen das Planksche Wirkungsquantum sowie die Masse eines Elektrons mit ein. Dem Operator H entspricht, wie bereits gesagt, die Gesamtenergie des Systems und V der potentiellen Energie. Vertrackt und unanschaulich werden die Verhältnisse dadurch, dass in jedem Term die Wellenfunktion ψ vorkommt, einmal als Ableitung $\Delta\psi(x)$, d. h. als die ‚Krümmung‘ der Wellenfunktion und dann nochmals in Bezug auf die Gesamtenergie.

Etwas komplizierter wird es, wenn man die Schrödinger-Gleichung in ihrer zeitabhängigen Form formuliert:

$$(-\hbar^2/2m) \Delta\psi(x,t) + V(x) \psi(x,t) = i \hbar d\psi(x,t)/dt$$

Rechts erscheint nun auch noch die zeitliche Ableitung der Wellenfunktion (d/dt). Zudem taucht der Faktor i auf (für i imaginär), der darauf hinweist, dass wir es mit komplexen Zahlen zu tun haben. Menschen ohne vertiefende mathematische Ausbildung fällt es schwer, mit diesen Beziehungen konkret umgehen und rechnen zu können. Dies hindert uns jedoch wiederum nicht, das Grundprinzip des Formalismus zu verstehen. Im Zentrum steht auch hier wieder die Wellenfunktion ψ , nach der man zu suchen hat, um die Eigenfunktionen der dargestellten Beziehung ermitteln zu können. Hat man ψ , so ergeben sich hieraus auch die Eigenwerte, welche die Quantisierung beschreiben. Um es hier mit Prigogine zusammenzufassen:

»Allen physikalischen Größen der klassischen Mechanik entspricht in der Quantenphysik ein Operator, und die numerischen Werte, welche diese physikalische Größe annehmen kann, sind die Eigenwerte des Operators. Der wesentliche Punkt ist, daß der Begriff der physikalischen Größe (dargestellt durch einen Operator) sich nun von dem seiner numerischen Werte (dargestellt

28 Die Formeln und teilweise die Beschreibung sind der Einführung von Martin Bäker entnommen (<http://www.scienceblogs.de/hier-wohnen-drachen/2010/11/die-schrodinger-gleichung-teil-i.php>).

durch die Eigenwerte des Operators) unterscheidet. Insbesondere wird die Energie nun durch den Hamilton-Operator dargestellt und die Niveaus, d. h. die beobachteten Energiewerte, werden mit den diesem Operator entsprechenden Eigenwerten identifiziert«.²⁹

Während also Heisenberg die klassischen Größen ›Energie‹, ›Impuls‹ und ›Ort‹ mittels mathematischer Hochabstraktion durch Matrizen ersetzt hat, wählte Schrödinger den Weg, diese durch Operatoren zu umschreiben. Anstelle einfacher Variablen tritt nun eine komplexe Funktionsbeziehung auf, die als Eigenwerte die Phänomene auswirkt, welche als gequantelte Verhältnisse empirisch beobachtet werden können.

Doch auch dieser Formalismus hat zwei Eigenarten, die ein tieferes Verständnis seiner Bedeutung verdecken. Zum einen tritt ψ in jedem Term auf und lässt sich entsprechend nicht in einer Weise isolieren, auf die seine Bedeutung anschaulich wird. Man kann also nicht zu einer Darstellung gelangen, entsprechend der ψ als Relation, Summe, Produkt oder Quotient klassischer physikalischer Größen erscheint. Zum anderen tauchen in dem Formalismus imaginäre Zahlen auf (siehe zur Erklärung imaginärer Zahlen den Abschnitt zur Rolle der Mathematik in der Einleitung). Imaginäre Zahlen eröffnen die Möglichkeit, periodische Vorgänge, wie etwa Sinusschwingungen, auf eine einfache und mathematisch elegante Weise in eine Gleichung einzubinden.

Schrödinger konnte selbst zeigen, dass seine Wellengleichung in ihren heuristischen Konsequenzen als äquivalent zur Heisenbergschen Matrizenmechanik zu sehen ist. Beide Wege bieten eine Lösung des Quantisierungsproblems.³⁰ Dem ›Postulat³¹ der Schrödinger-Gleichung liegt jedoch eine andere Intuition zugrunde als Heisenbergs abstraktem Entwurf. Schrödinger hoffte, auf diesem Weg die subatomaren Prozesse in einem physikalisch anschaulichen Sinne als Wellen beschreiben zu können, denn in Bezug auf die mit den imaginären Zahlen assoziierten Kreisfunktionen zeigt sein Formalismus gewisse Homologien mit anderen Schwingungsvorgängen:

»Gleichungen ähnlicher Art wie die Schrödinger-Gleichung sind in der klassischen Behandlung verschiedener Wellenvorgän-

²⁹ Prigogine/Stengers (1990, 232).

³⁰ Siehe Schrödinger (1926).

³¹ Die Schrödinger-Gleichung wird innerhalb der Physikgeschichte als sogenanntes ›Postulat‹ betrachtet. Anders als beispielsweise in der Herleitung der Heisenbergschen Matrizenmechanik wird eine Beziehung *ad hoc* postuliert, um auf diesem Wege eine Beziehung zu finden, welche die beobachteten Verhältnisse angemessen zu beschreiben in der Lage ist.

ge wohlbekannt; bei der Berechnung von Eigenfrequenzen von Hohlräumen treten die ganzen Zahlen ganz natürlich und verständlich auf, was wir ja schon erwähnt haben. Die Funktion W könnte auch, wenigstens im Fall eines einzigen Elektrons, als ein Oszillationszustand veranschaulicht werden. Kein Wunder, daß die Schrödingersche Wellenmechanik viel populärer war als die Matrizenmechanik von Heisenberg, Born und Jordan, die viel revolutionärer war, was sich schon in ihrer abstrakten Mathematik äußerte. Schrödinger selbst war auch der Meinung, daß seine Theorie eine Rückkehr zur klassischen Physik mit kontinuierlichen Größen und streng deterministischem Hintergrund ermöglichen würde. Er führte statt eines punktförmigen Elektrons ein Gebilde mit kontinuierlich verteilter Ladung ein, wobei die Funktion $e |\psi|^2$ als Ladungsdichteverteilung gedeutet wurde«.³²

Schrödingers Hoffnung, die Wellenfunktion ψ ›klassisch‹ als Potenzialwelle deuten zu können, ließ sich jedoch nicht halten.³³ Was aber ψ nun genau darstellt, entzieht sich einer offensichtlichen Interpretation. Wie bereits erwähnt, taucht ψ in jedem Term der Schrödin-

32 Simonyi (2004, 449).

33 »[Schrödinger] nahm verständlicherweise an, seine Wellen seien die anschauliche Realität hinter Heisenbergs abstraktem Formalismus. So hoffte er anfangs, das Problem des Dualismus gelöst zu haben, im Sinne der obigen Lösung: Es sollte überhaupt nur Felder geben, eine reine Kontinuitätsphysik. Die quantentheoretischen Emergenzbeziehungen, z. B. den Compton-Effekt konnte er als reine Frequenzbeziehungen zwischen Licht- und Materiewelle deuten. Er wollte die ›makroskopischen‹ Begriffe der Energie und des Impulses in der eigentlichen, der mikroskopischen Physik vollständig durch die Begriffe der Frequenz und der Wellenzahl ersetzen. Dann brauchte es keinerlei ›Quantensprünge‹ mehr zu geben, sondern nur kontinuierliche Übergänge in den Wellenfunktionen. Die Physik konnte dann, so hoffte er, wieder rein deterministisch sein. [...] Schrödingers Auffassung scheitert nicht nur am Auseinanderlaufen der Wellenpakete. Man erkannte, daß Schrödingers Welle im Konfigurationsraum etwas völlig anderes ist als de Broglies Welle im dreidimensionalen Raum. De Broglies Welle ist ein klassisches Feld. Es steht nichts im Wege, z. B. ihre elektrostatische Selbstwechselwirkung durch eine nichtlineare Wellengleichung oder ihre Wechselwirkung mit dem Maxwell-Feld durch eine multilinearare Gleichung in ψ , ψ^* und der elektromagnetischen Feldstärke F_{ik} zu beschreiben. Schrödingers Beschreibung des Einelektronenproblems, also des Wasserstoffatoms, konnte als Theorie einer de Broglie-Welle aufgefaßt werden. Schon das Zweielektronenproblem (Helium), das, nach Einführung des Elektronenspins und des Pauli-Prinzips, mit Schrödingers Methode streng lösbar war, blieb der klassischen de Broglie-Welle unzugänglich« (v. Weizsäcker 1994, 494).

ger-Gleichung auf und lässt sich entsprechend nicht in einer Weise isolieren, dass seine physikalische Bedeutung in einfacher Weise verständlich wird. Die mit der Wellenfunktion gegebene vermeintliche anschaulichkeit ist damit wieder ruiniert. Die mit den imaginären Zahlen implizierten Zusammenhänge deuten zwar auf Wellenbeziehungen hin. Es stellt sich nun jedoch darüber hinaus die Frage, aus was die Wellen bestehen. Dem Formalismus nach besitzen sie keine physikalische Dimension wie Masse, Ladung, Impuls, Energie etc.

Die Schrödinger-Gleichung schien zunächst eine Möglichkeit zu bieten, die Quantentheorie auf eine klassische anschauungsweise zurückzuführen, nämlich auf das vertraute Bild einer Welle. Doch die inneren Beziehungen des mathematischen Formalismus zeigen sich komplexer und entziehen sich einer unmittelbaren Deutung, da sich nicht sagen lässt, was für Wellen mit der Gleichung impliziert sind. Wir treffen jetzt mit Schrödinger auf eine Formulierung der Quantentheorie, die zwar mathematisch anschaulicher ist als die Heisenbergsche Matrizenmechanik, jedoch physikalisch weiterhin jeglicher anschauung entbehrt.

Born: Die statistische Interpretation der Wellenfunktion

Max Born wählte einen anderen Weg, die Wellenfunktion zu verstehen. Anders als Schrödinger ging er dabei weiterhin von der Teilchennatur der Elektronen aus und interpretierte die mit der Wellenfunktion formulierte Beziehung als eine Wahrscheinlichkeitsdichte, die ausdrückt, mit welcher Häufigkeit bei wiederholtem Experiment ein Elektron an einem bestimmten Ort zu erwarten ist. In seinem mit Norbert Wiener schon im Jahr 1926 veröffentlichten Artikel gab er der Wellenfunktion damit eine grundlegend statistische Interpretation.³⁴ Die Wellenfunktion – so die Pointe der Argumentation – erlaube es, eine Wahrscheinlichkeitsamplitude zu berechnen, deren Quadrat dann eben die Wahrscheinlichkeit ausdrückt, inwiefern ein Teilchen bei einer Messung an einem bestimmten Ort anzutreffen sei.³⁵

34 Born/Wiener (1926).

35 »Der Zustand erlaubt es, die Wahrscheinlichkeiten für den Ausgang einer Messung vorherzusagen. Wenn $= \sum n$ die Entwicklung des Zustandes nach Eigenfunktionen $\{n\}$ eines Operators A ist, dann ist cn^2 gerade die Wahrscheinlichkeit, für den Zustand bezüglich der zugehörigen Observable den Eigenwert n zu messen. Nach der Messung befindet sich das System in diesem Eigenzustand. Diese Interpretation wurde von Max Born 1926 vorgeschlagen. Borns Regel ist ein zentraler Bestandteil der Quantenmechanik, denn schließlich adressiert sie die Frage, welcher Zusammenhang zwischen Theorie und Experiment besteht. Man beachte, dass die Quantenmechanik nur Wahrscheinlichkeitsaussagen trifft.« (Passon 2010, 20 f.).

Borns Regel ist innerhalb der Quantenmechanik allgemein als das ›Messpostulat‹ anerkannt, welches dem allgemeinen Formalismus hinzuzufügen ist. Auf den ersten Blick scheint hiermit auch das Deutungsproblem gelöst.

Mit Born sieht es so aus, als habe man es auf subatomarer Ebene mit Zufallsprozessen zu tun, die in Bezug auf die nun weiterhin annehmende Teilchennatur von Elektronen, Atomen oder Lichtquanten einfach als Streuung beschrieben werden können. Dies hätte dann zwar Konsequenzen in Hinblick auf die Vorstellung von Kausalität und Determinismus, denn minimale, zufällige Schwankungen in den Ausgangsbedingungen können makroskopische Auswirkungen haben. Doch das klassische Weltbild ist hiermit noch nicht grundsätzlich infrage gestellt, da man sich weiterhin vorstellen kann, dass das Verhalten der untersuchten Systeme durch klassisch beschreibbare Teilchenbewegungen determiniert wird.³⁶

Borns statistische Interpretation stellt einen Versuch dar, mit dem Teilchenbild zu einem klassischen physikalischen Verständnis zurückzukehren.

Die Kopenhagener Interpretation: Verhältnisse, die mit den Mitteln der Sprache nicht beschreibbar sind

Doch hiermit ist das Deutungsproblem der Quantenphysik nicht wirklich gelöst, denn die wichtigste Annahme der Quantenmechanik besteht darin, die Idee von einer Elektronenbahn und damit auch vom Elektron als Partikel grundsätzlich aufzugeben.³⁷ Auch in der Schrödinger-Gleichung lässt sich das Eigenwertproblem nur dadurch lösen, dass von einer wie auch immer zu verstehenden Ausbreitung der Wellenfunktion ψ ausgegangen wird. Hier überlagern sich allerdings unterschiedliche Wellen und interferieren entsprechend. Deshalb können jetzt nur bestimmte Werte als Eigenlösungen eingenommen werden.

³⁶ Diese Interpretation wird später insbesondere auch von Karl Popper (1967) verfochten. Vgl. Kapitel II.1.

³⁷ Weizsäcker bemerkt hierzu: »Heisenberg sagte mir einmal: ›Born hat seine Deutung damals nur veröffentlicht, weil er nicht verstanden hat, daß es so nicht geht. [...] Man kann die Schwierigkeit an der sprachlichen Formulierung des Bornschen Satzes ablesen. Sowohl seine erste wie seine zweite Hälfte wählt noch eine klassische Sprache. Der Ausdruck ›die Bewegung der Partikel‹ scheint zu verraten, daß Born noch nicht gesehen hatte, was Heisenberg 1927 aussprach, daß nämlich der Begriff der Bahn eines Teilchens überhaupt aufgegeben werden muß« (v. Weizsäcker 1994, 496).

Die entscheidende Frage ist hier also nicht, ob man in der Beschreibung auf statistische Elemente – und damit den Zufall – zurückgreift, sondern ob man bereit ist, die klassische Auffassung von Realität aufzugeben. Nimmt man die Schrödinger-Gleichung ernst, so bedeutet dies, dass es Wahrscheinlichkeitswellen gibt, die sich entsprechend einem deterministischen Zeitverlauf ausbreiten. Was aber nun sind Wahrscheinlichkeitswellen? Wahrscheinlichkeiten sind Koeffizienten die zwischen 0 und 1 liegen können (0 – 100 % Eintrittwahrscheinlichkeit), welche aber keine physikalische Dimension wie Kraft, Gewicht, Länge oder Ladung besitzen. Sie stellen damit buchstäblich »Wellen von nichts« dar.³⁸

Darüber hinaus können Wahrscheinlichkeiten nur positive Werte annehmen, was im Ergebnis durch das Quadrat des Absolutwertes der Wahrscheinlichkeitsamplitude auch gewährleistet ist. Da aber in der Überlagerung unterschiedlicher Wellenmuster auch negative Wahrscheinlichkeitsamplituden vorkommen und entsprechend verrechnet werden, lässt sich die Interpretation des statistischen Kalküls jedoch nicht mit klassischen Mitteln bewältigen. Wenn man von streuenden Einzelteilchen ausgehen würde, stellt sich die Frage, warum und wie diese in einer Weise miteinander wechselwirken könnten, sodass beispielsweise auf dem Schirm im Doppelpaltexperiment Interferenzmuster auftreten.

Der unhintergehbare Welle-Teilchen-Dualismus wirft ein Dilemma auf, das sich nicht mit den Hausmitteln der klassischen physikalischen Anschauungen lösen lässt. Man hat jetzt zwar einen mathematischen Formalismus, der sich über ein Wahrscheinlichkeitskalkül mit konkreten Messergebnissen in Beziehung setzen lässt, doch man weiß damit immer noch nicht, was dies physikalisch-konzeptionell bedeuten soll. Spätestens mit der Schrödinger-Gleichung wirft die Quantentheorie also ein zentrales Bezugsproblem auf, das die Physiker zu neuen Antworten auffordert. Schauen wir im Folgenden auf weitere Lösungsversuche, die von den Quantenphysikern der ersten Generation hierauf gegeben wurden.

Niels Bohr verneinte bekanntlich die Möglichkeit einer realistischen Interpretation der Quantenphysik. Da uns aber nur die klassischen Begriffe und Anschauungen zur Verfügung stünden, schlägt er vor, mit dem Wellenbild und dem Teilchenbild zwei komplementäre, sich im Bereich der Quantenwelt gegenseitig ergänzende Beschreibungsweisen zu verwenden. Je nachdem, auf welche Weise man eine Messung vornehme, erscheine jeweils ein anderer Aspekt. Quantenobjekt und Messvorrichtung sind entsprechend jeweils zusammen zu denken, woraus jedoch folge, dass niemals ein vollständiges Bild eines Quantenobjekts erreicht werden könne, da niemals beide Be-

³⁸ So das bereits angeführte Zitat von Laughlin (2007).

schreibungen gleichzeitig Sinn ergeben. Bohr geht damit in Bezug auf die subatomaren Wirklichkeiten von einer nicht überschreitbaren epistemischen Grenze aus. Auch der ontologische Status der Quantenwelt bleibt hiermit undefiniert, denn man könnte aufgrund der Erkenntnisschranken nicht wirklich wissen, mit was man es da zu tun hat, bzw. man wisse nur, dass die Beschreibungsweisen der klassischen Physik hier versagen.

Genau dies wollte jedoch gerade Einstein nicht als die letzte Wahrheit akzeptieren. Wenngleich er die nicht-klassischen Konsequenzen der Quantentheorie schnell begriff, hoffte er zeitlebens, eine Alternative zur Quantentheorie zu finden, die weniger groteske epistemische und ontologische Konsequenzen mit sich bringe.³⁹

Heisenberg greift mit der Kopenhagener Deutung ebenfalls Bohrs Komplementaritätsprinzip auf, gibt diesem jedoch eine etwas andere Bedeutung, da für ihn die Wellenfunktion auf (reale) Tendenzen und Möglichkeiten verweist. Als Ausgangslage erscheint wie bei Bohr das Problem, dass man nur die klassischen Begriffe zur Verfügung habe, um die Verhältnisse zu beschreiben:

»Die Kopenhagener Deutung der Quantentheorie beginnt mit einem Paradox. Jedes physikalische Experiment, gleichgültig, ob es sich auf Erscheinungen des täglichen Lebens oder auf Atomphysik bezieht, muß in den Begriffen der klassischen Physik beschrieben werden. Diese Begriffe der klassischen Physik bilden die Sprache, in der wir die Anordnung unserer Versuche angeben und die Ergebnisse festlegen. Wir können sie nicht durch andere ersetzen. Trotzdem ist die Anwendbarkeit dieser Begriffe begrenzt durch die Unbestimmtheitsrelationen. Wir müssen uns dieser begrenzten Anwendbarkeit der klassischen Begriffe bewußt bleiben, während

³⁹ Für das Verhältnis von Bohr, Born und Einstein ergibt sich hiermit: »Man kann den Unterschied zwischen Born und Bohr auch dadurch kennzeichnen, daß Born die Abweichung der Quantentheorie von der klassischen Physik zeitlebens durch die indeterministische Abweichung vom Kausalgesetz beschrieb, während für Bohr die veränderte Auffassung von der Realität das Entscheidende war. Einstein hat die Radikalität des Bohrschen Standpunkts genau verstanden; eben dies war es, was er dann an der Quantentheorie missbilligte. Born versuchte in seinem Briefwechsel mit Einstein vergeblich, den Freund zu überzeugen, der Bruch gehe gar nicht so tief, denn schon in der klassischen Physik führten minimale Unbestimmtheiten in den Anfangsbedingungen zu beliebig großen Unbestimmtheiten bei längerfristigen Prognosen. Pauli versuchte schließlich in einem Brief an Born aus Princeton, Born klarzumachen, daß sein Insistieren auf der Unvorhersagbarkeit der Ereignisse Einsteins Pointe, den Realitätsbegriff der klassischen Physik, gar nicht treffe. Dieser Gedanke scheint aber Born fremd geblieben zu sein« (v. Weizsäcker 1994, 497).

wir sie anwenden, aber wir können und sollten nicht versuchen, sie zu verbessern.«⁴⁰

Im Falle einer Messung erlaube die Quantentheorie jedoch im Einklang mit dem Born'schen ›Messpostulat‹ eine statistische Beschreibung der in der klassischen Welt zu erwartenden Ergebnisse:

»Sobald in der Quantentheorie die Wahrscheinlichkeitsfunktion zur Anfangszeit aus der Beobachtung bestimmt worden ist, kann aus den Gesetzen dieser Theorie die Wahrscheinlichkeitsfunktion zu irgendeiner späteren Zeit berechnet werden und man kann in dieser Weise im voraus die Wahrscheinlichkeit bestimmen, daß eine Messung einen bestimmten Wert für die zu messende Größe liefert. Man kann z. B. eine Voraussage über die Wahrscheinlichkeit machen, mit der man zu einer späteren Zeit das Elektron an einem bestimmten Punkt in der Nebelkammer finden wird.«.⁴¹

Auf der Ebene der durch den Formalismus der Quantentheorie rekonstruierten physikalischen Wirklichkeit verabschiedet sich Heisenberg jedoch von der Idee von Teilchen, die – wie in der Bornschen Interpretation der statistischen Streuung – unbekannten Bahnen folgen. Die Phänomenologisierung von Ereignissen wird nun an die Messung gekoppelt. Vor der Messung gebe es keine Ereignisse, sondern nur Tendenzen. Entsprechend könne nicht einmal angegeben werden, was zwischen zwei Messungen geschehe, da ohne Messung klassische physikalische Ereignisse gar nicht existieren würden. Quantensysteme seien keine Objekte, die eine in sich unabhängige Realität besitzen. Sie erscheinen nur als relationale Beziehungen, als Möglichkeitsräume, die aufgrund einer weiteren Relation – eben der Messung – erschlossen werden können:

»Es muß aber betont werden, daß die Wahrscheinlichkeitsfunktion nicht selbst einen Ablauf von Ereignissen in der Zeit darstellt. Sie stellt etwa eine Tendenz von Vorgängen, die Möglichkeit für Vorgänge oder unsere Kenntnis von Vorgängen dar. Die Wahrscheinlichkeitsfunktion kann mit der Wirklichkeit nur verbunden werden, wenn eine wesentliche Bedingung erfüllt ist: wenn nämlich eine Messung oder eine Beobachtung gemacht wird, um eine bestimmte Eigenschaft des Systems festzulegen. Nur dann erlaubt die Wahrscheinlichkeitsfunktion, das wahrscheinliche Ergebnis der neuen Messung zu berechnen. Das Ergebnis der Messung wird dabei wieder in den Begriffen der klassischen Physik angegeben.

⁴⁰ Heisenberg (2007, 67).

⁴¹ Ebd., 69.

[...] Es ist unmöglich, anzugeben, was mit dem System zwischen der Anfangsbeobachtung und der nächsten Messung geschieht. Nur im dritten Schritt [der wiederholten Messung] kann wieder der Wechsel vom Möglichen zum Faktischen vollzogen werden.«⁴²

Heisenbergs Interpretation wird vielfach mit dem Label des ›Subjektivismus‹ belegt, da in seiner Interpretation scheinbar gemeinsam subjektive und realistische Elemente einfließen. Teilweise spricht er anstelle von Messung von Beobachtung bzw. in Hinblick auf den Messvorgang auch von unserer subjektiven Kenntnis des Systems.⁴³ Ein solcher Vorwurf greift jedoch zu kurz. Im Angesicht des Dilemmas des Welle-Teilchen-Dualismus, der auf Ebene der theoretischen Modellierung jedoch keine physikalischen Objekte mehr vorfindet,

⁴² Ebd., 69 f.

⁴³ Siehe als Beispiel für das ontologische »gerrymandering« (Woolgar/Pawluch 1985) bei Heisenberg, die folgenden Ausführungen. Deutlich wird hier das Ringen um Worte angesichts von Reflexionsverhältnissen, die auch subjektivistische Deutungen nahelegen. Das Messparadoxon deutet sich hier schon deutlich an: »Die Wahrscheinlichkeitsfunktion vereinigt objektive und subjektive Elemente. Sie enthält Aussagen über Wahrscheinlichkeiten oder besser Tendenzen (Potentia in der aristotelischen Philosophie), und diese Aussagen sind völlig objektiv, sie hängen nicht von irgendeinem Beobachter ab. Außerdem enthält sie Aussagen über unsere Kenntnis des Systems, die natürlich subjektiv sein müssen, insfern sie ja für verschiedene Beobachter verschieden sein müssen. [...] Die Beobachtung selbst ändert die Wahrscheinlichkeitsfunktion unstetig. Sie wählt von allen möglichen Vorgängen den aus, der tatsächlich stattgefunden hat. Da sich durch die Beobachtung unsere Kenntnis des Systems unstetig geändert hat, hat sich auch ihre mathematische Darstellung unstetig geändert, und wir sprechen daher von einem ›Quantensprung‹. Wenn man aus dem alten Spruch ›Natura non facit saltus‹ eine Kritik der Quantentheorie ableiten wollte, so können wir antworten, daß sich unsere Kenntnis doch sicher plötzlich ändern kann und daß eben diese Tatsache, die unstetige Änderung unserer Erkenntnis, den Gebrauch des Begriffs ›Quantensprung‹ rechtfertigt. Der Übergang vom Möglichen und Faktischen findet also während des Beobachtungsaktes statt. Wenn wir beschreiben wollen, was in einem Atomvorgang geschieht, müssen wir davon ausgehen, dass das Wort ›geschieht‹ sich nur auf die Beobachtung beziehen kann, nicht auf die Situation zwischen zwei Beobachtungen. Es bezeichnet dabei den physikalischen, nicht den psychischen Akt der Beobachtung, und wir können sagen, daß der Übergang vom Möglichen zum Faktischen stattfindet, sobald die Wechselwirkung des Gegenstandes mit der Meßanordnung und damit mit der übrigen Welt ins Spiel gekommen ist« (Heisenberg 2007, 78 ff.).

wird hierbei das Ringen um Worte in unangemessener Weise auf philosophische Kampfbegriffe verkürzt.

Heisenbergs Denken zeigt sich als viel zu komplex, als dass es mit Attributen wie positivistisch, antirealistisch oder subjektivistisch charakterisiert werden könnte. An keiner Stelle hat Heisenberg die Auffassung vertreten, dass das Bewusstsein den Ausgang eines Quantenexperimentes im Sinne einer psychischen Kausalität (mit) bestimmen würde. Er hat jedoch erkannt, dass die ontologischen Begriffe der alteuropäischen Tradition hier nicht mehr weiterhelfen. Die Unterscheidung von Sein und Nichtsein reicht nicht aus, um den Strukturreichtum des quantentheoretischen Formalismus zu beschreiben. Nolens volens treten hier Möglichkeitshorizonte in die Beschreibung mit ein, entsprechend derer das Gesetz vom ausgeschlossenen Drittem (*tertium non datur*) in Richtung eines »sowohl als auch« zu überwinden ist.

Heisenberg und Bohr haben mit der Kopenhagener Interpretation der Quantenphysik einen Bruch mit der klassischen Physik vollzogen. Ihnen war klar, dass weder der Rekurs auf eine deterministische Wellenbeschreibung, auf die Schrödinger noch lange zu hoffen wagte, noch ein reines Teilchenmodell, beispielsweise Ensembles streuender Teilchen, mit dem Formalismus der Quantentheorie im Einklang stehen.

Die Kopenhagener Interpretation wirft eine Paradoxie auf, die mit der Frage zusammenhängt, was eigentlich eine Messung oder eine Beobachtung darstellt. Dies wird später noch deutlicher werden, wenn wir auf v. Neumanns mathematische Grundlegung der Quantentheorie eingehen werden. Hier wird dann der Messapparat selbst als ein quantenmechanisch beschreibbares System betrachtet, wodurch das Messproblem in einen infiniten Regress sich aufeinander beziehender Messsysteme überführt wird.

Interessanterweise gelingt es der Kopenhagener Deutung, sowohl das Teilchenbild als auch das Wellenbild als klassische Anschauungen weiterhin mitzuführen, um beide dann wiederum bei Bedarf zurückweisen zu können. In Hinblick auf ihre physikalische Konzeption ist diese Interpretation der Quantentheorie somit streng genommen auf Basis einer transklassischen Logik gebaut,⁴⁴ denn sie erlaubt unterschiedliche Referenzperspektiven, von denen aus gesehen jeweils ein anderer Sachverhalt erscheint, wobei die jeweiligen Perspektiven nicht mehr logisch widerspruchsfrei ineinander überführt werden können. Die Bruchstelle zwischen diesen beiden, nun als komple-

⁴⁴ Siehe zur Konzeption einer mehrwertigen Logik Günther (1978) sowie ausführlicher Kapitel VII.3.

mentär ausgewiesenen Beschreibungsebenen, wird jetzt durch den Beobachter besetzt.

All dies lässt deutlich werden, dass die Quantentheorie mit der Kopenhagener Deutung – wenngleich ihr entscheidender Durchbruch nur auf Basis einer mathematischen Hochabstraktion erreicht werden konnte – keineswegs in einer positivistischen Perspektive aufgeht, die nur Mathematik und experimentelle Daten anerkennt. Die Gründungsväter der Quantentheorie ringen vielmehr weiterhin um eine physikalisch-konzeptionelle Deutung, selbst wenn hierfür in Kauf genommen werden muss, den Beobachter in die theoretische Reflexion mit einbeziehen zu müssen.

Die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation als theoretische Konsequenz der Quantenmechanik

Insbesondere mit der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation wird der nicht-klassische Charakter des Formalismus der Quantenphysik deutlich. Dies ist auch der Grund, warum die Unbestimmtheitsrelation oft nicht richtig verstanden wird. Sie wird vielfach als eine Unschärfe interpretiert, die sich einfach daraus ergibt, dass man bei der Messung von Quantenobjekten nicht genau genug hinschauen könne und deswegen die Dinge eben unscharf erschienen.⁴⁵ Dies ist jedoch ein Missverständnis. Die quantenmechanische Unbestimmtheit ergibt sich nicht aus der beschränkten Auflösung unserer Messverfahren, sondern folgt unmittelbar aus der mathematischen Modellierung des Eigenwertproblems. Wie bereits erwähnt, macht es sowohl in Heisenbergs Matrizenmechanik als auch in der Schrödinger-Gleichung einen Unterschied, in welcher Reihenfolge man Operatoren bzw. Matrizen

⁴⁵ Der Begriff der Unschärfe folgt noch dem klassischen Bild, dass es lokalisierbare Teilchen gebe. Lévy-Leblond hierzu: »Wenn ich versuche, dem Elektron eine wohl definierte Position zuzuschreiben, indem ich es zwinge, sich an einem präzise bestimmten Punkt aufzuhalten, verliere ich mit einem Schlag alle Information hinsichtlich seiner Geschwindigkeit, und umgekehrt. Dabei handelt es sich nicht um ‚Unschärfen‘ oder ‚Ungewissheiten‘. Man kann diesen Ausdruck der ‚Unschärfe‘ nur verwenden, wenn man an der Vorstellung festhält, dass das Elektron an einem präzise bestimmten Ort sei, ohne selbst zu wissen, wo, und eine präzise bestimmte Geschwindigkeit besitze, die man nur nicht kenne. Das aber hieße, es sich weiterhin als ein klassisches Teilchen vorzustellen; in diesem Sinne ist der Ausdruck ‚Unschärfe‘ ein Relikt klassischer Konzeptionen, von denen die eigentliche Quantentheorie sich trennt« (Lévy-Leblond 2011, 57).

miteinander multipliziert. Erzeugt man beispielsweise das Produkt aus dem Impulsoperator und dem Ortsoperator, so gilt:

$$pq \neq qp$$

Die Quantentheorie erlaubt mit der Vertauschungsrelation eine genauere Bestimmung:

$$pq - qp = \hbar/2\pi i 1$$

Hieraus lässt sich schließlich in Hinblick auf die Genauigkeit einer möglichen Bestimmung von p und q folgende Ungleichung ableiten:

$$\Delta p \Delta q \geq \hbar$$

Impuls und Ort lassen sich nicht beide vollkommen genau bestimmen, denn wenn der eine Wert sehr genau bestimmt wird, also etwa Δp fast null wird, muss die Abweichung des anderen Wertes Δq sehr groß werden, um der Ungleichung gerecht zu werden. Das Produkt muss größer oder gleich der mit dem Planckschen Wirkungsquantum gegebenen Grenze sein.

Wenn aber die Quantenmechanik mit ihrer derzeitigen mathematischen Formulierung die Verhältnisse angemessen beschreibt, die Theorie also »richtig« ist, dann folgt hieraus, dass die Unbestimmtheitsrelation prinzipiell zu gelten hat. Die Quantenwelt hat dann weniger Freiheitsgrade als die klassische Welt, da in den sie beschreibenden Gleichungen Variablen wie z. B. der Ort oder der Impuls nicht mehr unabhängig voneinander beschrieben werden können. Sie sind in einer komplexen Beziehung miteinander verwoben. Die Variablen Impuls und Ort können niemals gleichzeitig bestimmt sein, wenn die Schrödinger-Gleichung gilt.⁴⁶

⁴⁶ Mit Prigogine gesprochen gilt: »In der klassischen Mechanik sind Koordinaten und Impulse insofern unabhängig, als wir einer Koordinate ganz unabhängig von dem Wert, den wir dem Impuls zugeschrieben haben, einen numerischen Wert zuschreiben können. Die Plancksche Konstante h reduziert jedoch die Anzahl der unabhängigen Variablen. Wir hätten diese grundlegende Tatsache schon der Einstein-de Broglie-Beziehung $= h/p$ entnehmen können, die, wie wir gesehen haben, die Wellenlänge mit dem Impuls verknüpft. Die Plancksche Konstante h drückt eine Beziehung mit Längen (die eng mit dem Koordinatenbegriff zusammenhängen) und Impulsen aus. Der Welle-Teilchen-Dualismus zieht einen tiefgreifenden Wandel der Konzeptionen nach sich, auf denen die klassische Physik beruhte. [...] Der Impulsoperator wird dann zu einer Ableitung nach der Koordinate: $pop = h/(2\pi i)/ q$. Diese beiden

Die Bestimmtheit ergibt sich als theoretische Konsequenz der quantentheoretischen Modellierung und nicht – wie oftmals missverstanden – aus einer positivistischen Haltung heraus, entsprechend der man die Dinge eben nicht genau beobachten könne, weil die Messung das zu Messende störe. Weizsäcker fasst das Dilemma der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation folgendermaßen zusammen:

»Die klassischen Eigenschaften eines Teilchens, Ort und Impuls sind prinzipiell beobachtbar, aber sie sind prinzipiell nicht zugleich beobachtbar. Dies war nicht eine Prämisse, sondern eine Konsequenz der Quantentheorie. Die Theorie hatte entschieden, was beobachtbar ist. In der Sprache des Hilbertraums gesagt: die Operatoren Ort und Impuls haben jeweils Eigenvektoren, aber sie haben keine gemeinsamen Eigenvektoren. Auf einer klassischen Teilchenbahn müssten beide zugleich bestimmt sein; deshalb existiert die klassische Bahn niemals. [...] Heisenbergs These ist

fundamentalen Operatoren können auch auf andere Weise ausgedrückt werden. Wichtig ist, daß in beiden Fällen nur eine Größe auftaucht (entweder eine Koordinate oder ein Impuls), aber nicht beide. Man kann insofern sagen, daß die Einführung der Quantenmechanik die Anzahl der klassischen, mechanischen Variablen durch den Faktor 2 dividiert. Aus dieser Einführung von Operatoren in der Quantenmechanik resultiert eine fundamentale Eigenschaft: die beiden Operatoren qop , pop vertauschen nicht miteinander. Es macht natürlich einen Unterschied, ob wir eine Funktion zunächst mit der Koordinate multiplizieren und die Ableitung des Produkts nehmen oder ob wir zunächst die Ableitung nehmen und dann mit der Koordinate multiplizieren. Diese mathematische Eigenschaft der Nichtkommutativität hat eine tiefgreifende Bedeutung, die in der Tat über die Quantenmechanik hinausgeht. Sie bleibt immer dann gültig, wenn wir einen Operatorformalismus verwenden können [...]: Nur kommutierende Operatoren lassen gemeinsame Eigenfunktionen zu. Wir können deshalb keine Funktion finden, die eine Eigenfunktion sowohl der Koordinate als auch des Impulses wäre. Aufgrund der Definition der Koordinaten- und Impulsoperatoren in der Quantenmechanik kann es keinen Zustand geben, in dem die physikalischen Größen, die Koordinate q und der Impuls p gleichzeitig wohldefinierte Werte haben. Dieser in der klassischen Mechanik unbekannte Sachverhalt wird durch die berühmten Heisenberg'schen Unschärferelationen ausgedrückt. Wir können eine Koordinate und einen Impuls messen, doch die Unschärfen q , p , mit denen eine Messung behaftet sein wird, hängen durch die Heisenberg'sche Ungleichung $qp \geq h$ miteinander zusammen. Wir können q beliebig klein werden lassen, doch dann geht p gegen Unendlich und umgekehrt« (Prigogine/Stengers 1990, 235 f.).

oft ›positivistisch‹ missverstanden worden, als behauptete sie: ›Zustände mit gleichzeitig scharf bestimmtem Ort und Impuls können nicht beobachtet werden, also existieren sie nicht.‹ Nur die logische Umkehrung ist richtig: ›Diese Zustände existieren gemäß der Theorie nicht, also können sie nicht beobachtet werden.‹ ›Sie existieren gemäß der Theorie nicht: das ist die obige Aussage, daß sie im Hilbertraum nicht vorkommen. [...] Irreführend ist die Behauptung, die Unbestimmtheit entstamme der Störung des Zustands durch den Meßprozeß. Gebraucht man das Wort ›Zustand‹ im Sinne der Quantentheorie, als Strahl im Hilbertraum, so existiert weder vor noch während noch nach der Messung ein Zustand mit zugleich bestimmten Ort und Impuls. Die ›Störung‹ ist die Reduktion des Wellenpaketes, also der Übergang zu einem neuen Wissen durch die Messung. Vorher kannte man z. B. den Impuls des Elektrons, und es hatte daher keinen Ort: nachher kennt man seinen Ort und es hat daher keinen Impuls.‹⁴⁷

Im quantentheoretischen Formalismus gibt es keine Rückkehr mehr zu einer Beschreibung, entsprechend der sich Teilchen einem bestimmten Impuls folgend auf einer Bahn in der Raumzeit bewegen. Hätte man den Ort eines Teilchens genau bestimmt, so wäre sein Impuls zugleich vollkommen unbestimmt, und das Teilchen könnte entsprechend im nächsten Moment an einem beliebigen anderen Ort im Universum erscheinen. In Bezug auf die hiermit formulierte Quantentheorie gibt es nur zwei Möglichkeiten: Entweder man akzeptiert die Theorieanlage und hat damit ihre absonderlichen Konsequenzen in Kauf zu nehmen, oder man sieht die Theorie als falsch oder zumindest unvollständig an. Wenn man aber dem Pfad folgt, der durch die Theorieanlage vorgezeichnet ist, dann ist hinzunehmen, dass quantenmechanische Zustände miteinander in nicht trivialer Weise verschränkt sind. Dies führt zu Konsequenzen, die dem Common Sense radikal zuwiderlaufen. Anhand des von Einstein vorgeschlagenen Gedankenexperimentes wird dies noch deutlicher werden.

An dieser Stelle ist jedoch schon auf eine andere Konsequenz der Unbestimmtheitsrelation hinzuweisen. Die Regel der Nicht-Vertauschbarkeit der Operatoren gilt auch für die Erweiterung der Quantentheorie zur Quantenfeldtheorie, mit der Teilchen und Felder auf einheitliche Weise beschrieben werden können. Die Variablen der klassischen Feldtheorie werden hier ebenfalls durch Operatoren ersetzt, um auf diese Weise die Quantenbedingungen in die Maxwell-schen Feldgleichungen einzuführen. Da aber aufgrund der Nichtvertauschbarkeit auch hier die Unbestimmtheitsrelation gilt, würde dies

47 Weizsäcker (1994, 502 f.).

bedeuten: Leerer Raum ist nicht wirklich leer, sondern durchwoven von Quantenobjekten, die sich unter bestimmten (Mess-)Bedingungen auch als Phänomene manifestieren können.⁴⁸ Die Quantentheorie, sobald als eine in sich schlüssige Theorieform etabliert, führte zu einer Theoriearbeit, in der zunächst die mathematischen Konsequenzen des Formalismus erkundet wurden. Die theoretischen Erkundungen bestätigten den nicht-klassischen Charakter der Theorieanlage. Im Vordergrund stehen jetzt mathematische Anschauungsmöglichkeiten, welche die physikalisch konzeptionellen Denkweisen der damaligen theoretischen Physik weit überschreiten. Hier kann jetzt das Unvorstellbare eruiert und erörtert werden. Die Voraussetzung hierfür ist die Autonomie einer Mathematik, die über den Beweis zu einer in sich konsistenten Formssprache findet. Nur auf Basis einer solchermaßen entsprechend interner Wahrheitskriterien stabilisierten Mathematik lassen sich Erkundungen rechtfertigen, die offensichtlich ins Bizarre führen und jeglichem Common Sense spotten.

Die Schrödinger-Gleichung und der Zeitpfeil

Die Schrödinger-Gleichung löst das Problem der Quantisierung dadurch, dass ein Teil der in der klassischen Physik vorkommenden Variablen durch Operatoren ersetzt werden. Hierdurch ergibt sich eine Funktion ψ als Lösung, wobei die Eigenwerte von ψ den möglichen Zuständen entsprechen, welche das Quantensystem annehmen kann. Wie bereits geschildert, entzieht sich die Wellenfunktion ψ (Wellen von nichts) einer anschaulichen Deutung bzw. einer Interpretation in Form klassischer physikalischer Begriffe.⁴⁹

48 »So zeigt sich, daß die dem elektrischen und magnetischen Feld entsprechenden Operatoren nicht miteinander vertauschbar sind und, daß folglich diese Felder nicht gleichzeitig mit beliebiger Genauigkeit bestimmt werden können. Daraus folgt aber, daß ein Zustand mit $E = 0$ und $B = 0$ nicht realisiert werden kann, daraus folgt wiederum, daß selbst ein strahlungsfreier Raum, das Photonenvakuum, eine Energie, die Nullpunktenergie besitzt« (Simonyi 2004, 459).

49 So etwa der Nobelpreisträger Robert B. Laughlin: »Quantenmechanische Materie besteht aus Wellen von nichts. Diese Vorstellung ist ein harter Brocken, weshalb man Studenten traditionell damit anfreundet, indem man zunächst etwas mit dem Namen Welle-Teilchen-Dualismus erklärt – der Vorstellung, Teilchen seien newtonsche Objekte, die gelegentlich miteinander wechselwirken, gebeugt werden und so fort, als wären sie Wellen. Das ist nicht richtig, aber wenn man es so lehrt, hindert man die geistigen Schaltkreise der Studenten am Durchbrennen. In Wahrheit gibt es keinen solchen Dualismus. Die ganze newtonsche Vorstellung von einem Objekt, das durch Position und Geschwindigkeit gekennzeichnet

Die ›Zeit‹ erscheint in diesem Formalismus jedoch weiterhin als eine klassische Variable. Sie wird nicht durch einen ›Zeit‹-Operator ersetzt. Die Wellenfunktion bleibt damit invariant gegenüber der Zeitrichtung. Hat man sie einmal, so kann man ψ prinzipiell für jeden Zeitpunkt aus Zukunft und Vergangenheit berechnen. Um mit Prigogine zu sprechen:

»Die Schrödinger-Gleichung bestimmt, genau wie die kanonische Gleichung in der klassischen Physik, eine reversible und deterministische Entwicklung. Die reversible Änderung einer Wellenfunktion entspricht einer reversiblen Bewegung längs einer Trajektorie. Andererseits erlaubt die Schrödinger-Gleichung, wenn die Wellenfunktion zu einem gegebenen Zeitpunkt bekannt ist, diese für jeden früheren oder späteren Augenblick zu berechnen; in dieser Hinsicht entspricht die Situation genau derjenigen der klassischen Mechanik. Das beruht auf der Tatsache, daß die Unschärferelationen der Quantenphysik nicht die Zeit enthalten. Diese ist noch immer eine Zahl und nicht ein Operator, und nur Operatoren können in den Heisenbergschen Unschärferelationen auftreten«.⁵⁰

Da die Wellenfunktion aber nur Wahrscheinlichkeiten angibt, ist mit der Schrödinger-Gleichung zwar die Entwicklung der ›Wahrscheinlichkeitsdichte‹ über die Zeit hinweg determiniert, aber nun ergibt sich das Problem, dass die Wahrscheinlichkeitsdichte keine klassische Variable der Physik darstellt. Allerdings gibt $|\psi(q)|^2$, das Absolutquadrat von ψ , die Wahrscheinlichkeit an, bei einer Messung

ist, ist falsch und muß durch etwas ersetzt werden, das wir Wellenfunktion nennen – eine Abstraktion, modelliert nach dem Vorbild der kleinen Druckschwankungen in der Luft, die beim Durchgang von Schall auftreten. Das wirft unweigerlich die Frage auf, was da eigentlich schwingt – ein wunderbares Beispiel für die Verwirrung, die man anrichtet, wenn man einen außergewöhnlichen Sachverhalt mit einem gewöhnlichen Wort benennt. [...] Außerhalb eines die Schwingungen übertragenden Mediums ergibt eine Welle keinen Sinn. In der Physik wird jedoch eine altehrwürdige Tradition aufrechterhalten: Man unterscheidet nicht zwischen unbeobachtbaren und nichtexistenten Dingen. Obwohl also Licht sich verhält wie Wellen einer Substanz – die man in den Anfängen des Elektromagnetismus als Äther bezeichnete –, gibt es keinen direkten Nachweis für diese Substanz, weshalb wir erklären, sie existiere nicht. Aus den gleichen Gründen sehen wir das Medium, das sich bei der Ausbreitung quantenmechanischer Wellen bewegt, als nichtexistent an. Dieses Problem ist jedoch weit irritierender als das des Lichts, weil Quantenwellen Materie sind und überdies messbare Aspekte aufweisen, die mit Schwingungen einer Substanz grundlos unvereinbar sind« (Laughlin 2007, 93 f.).

⁵⁰ Prigogine (1990, 241).

ein Quantenobjekt am Ort q anzutreffen. Durch die Messung manifestiert sich aber nur einer von mehreren möglichen Eigenwerten der Schrödinger-Gleichung:

»Es gibt nur einen Fall, in dem die Schrödinger-Gleichung zu einer deterministischen Vorhersage führt, und zwar dann, wenn ψ , statt eine Überlagerung von Eigenfunktionen zu sein, sich auf eine einzige Eigenfunktion reduziert. Unter einer idealen Messung versteht man genau eine derartige Reduktion der Wellenfunktion. Sie ist daher gleichzeitig eine Präparierung des Systems, derart, daß nunmehr das Ergebnis der Messung vorhergesagt werden kann. Wir ›wissen‹ dann, daß das System durch die entsprechende Eigenfunktion beschrieben wird.«.⁵¹

Die Messung führt zu einem Symmetriebruch. Ein irreversibles Moment tritt ein, das nicht durch die Schrödinger-Gleichung vorhergesagt wird oder beschrieben werden kann. Das System springt buchstäblich in einen anderen Zustand und kann von dort aus nicht mehr zurück, da mit den neuen Anfangsbedingungen eine neue Schrödinger-Gleichung gilt: Um es hier mit Heisenberg auszudrücken:

»Die Beobachtung selbst ändert die Wahrscheinlichkeitsfunktion unstetig. Sie wählt von allen möglichen Vorgängen den aus, der tatsächlich stattgefunden hat. Da sich durch die Beobachtung unsere Kenntnis des Systems unstetig geändert hat, hat sich auch ihre mathematische Darstellung unstetig geändert, und wir sprechen daher von einem ›Quantensprung‹.«⁵²

Aus theorieästhetischen wie auch aus theorieimmanenter Gründen erscheint der sogenannte Kollaps der Wellenfunktion jedoch problematisch. Auf der einen Seite lassen sich mit der Schrödinger-Gleichung und mittels ihrer von Dirac und v. Neumann ausgearbeiteten mathematischen Weiterentwicklungen zwar alle bekannten subatomaren Prozesse im Einklang mit einer Vielzahl experimenteller Daten angemessen beschreiben. Auf der anderen Seite ist die Messung mit einem Symmetriebruch verbunden, der offensichtlich als Kollaps der Wellenfunktion gedeutet werden kann. Laughlin drückt das Dilemma in seinem polemischen Stil folgendermaßen aus:

»Man käme zum Beispiel in Bedrängnis, wenn man auch nur einen einzigen Wissenschaftler nennen sollte, der behaupten würde, Schrödingers Gleichung sei unvereinbar mit der Quantenmecha-

⁵¹ Prigogine (1990, 241).

⁵² Heisenberg (2007, 80).

nik. Die meisten würden vielmehr sagen, Schrödingers Gleichung sei der Inbegriff der Quantenmechanik. Trotzdem findet man mit Leichtigkeit Fachleute, die einem Schauermärchen über den Kollaps der Wellenfunktion erzählen, also über ein Verhalten, das von Schrödingers Gleichung nicht vorhergesagt wird, obwohl es für die Messung wichtig ist. Beide Sichtweisen schließen sich natürlich gegenseitig aus. Wenn Schrödingers Gleichung den Kollaps der Wellenfunktion nicht vorhersagt und man diesen Kollaps dennoch in einem Experiment vorfindet, dann muß seine Gleichung unter bestimmten Umständen falsch sein, und das heißt, sie muß generell falsch sein. Derselbe Fachmann, der einem gerade mit dem Kollaps der Wellenfunktion die Geduld geraubt hat, ist dann aber mühelos in der Lage, zu einem Vortrag über Atomuhren anzuheben, eine höchst deterministische Technologie, die im wesentlichen auf der Quantenmechanik beruht und von Schrödingers Gleichung mit ungeheurer Präzision beschrieben wird.

Signifikant ist auch das Tabu, welches die Infragestellung der Kopenhagener Deutung verbietet – denn sie ist eine einmalige und höchst sonderbare Ausnahme von der üblichen Wissenschaftsethik, der zufolge alles in Frage gestellt werden kann und soll. Wer so töricht ist, das Thema zur Sprache zu bringen, wird sofort als Spinner abgestempelt. Dabei weiß jeder, der sich beruflich mit der Quantenphysik beschäftigt, daß Wellenfunktionen nicht kollabieren.«⁵³

Deutlich wird hier, dass mit der Kopenhagener Deutung die grundlegenden Paradoxien der Quantenmechanik nicht aufgehoben sind. Wir begegnen hier ersten Hinweisen auf ein Paradoxiemanagement, das auf Ressourcen außerhalb empirischer Überprüfbarkeit und mathematischer Beweisführung zurückgreift. Man lagert das Problem in die Begrenztheit der Sprache aus (»mit den klassischen Begriffen kann man die Sache nicht begreifen, aber wir haben eben nur die klassischen Begriffe zur Verfügung«). Man ontologisiert den Wellenkollaps (»wenngleich niemals eine kollabierende Welle beobachtet werden kann«) oder richtet an anderer Stelle ein Tabu ein, dass gebietet, weitere Fragen zu unterlassen (»prinzipiell lässt sich nicht mehr über Quantenzustände wissen«).

53 Laughlin (2008, 46 f.).

Von Neumann: die mathematische Grundlegung der Quantenmechanik

Der formale Abschluss der Quantenmechanik wurde 1932 durch den Mathematiker John v. Neumann mit seiner Monografie »Mathematische Grundlagen der Quantentheorie«⁵⁴ geleistet. Von Neumann folgte dabei Hilberts Programm einer axiomatischen Formulierung der Physik durch die Mathematik. Er verstand sich selbst als einen Kenner und Förderer der Theorie des Hilbertraums und sah hierin den Weg, die Quantenmechanik durch eine konsistente mathematische Theorie begründen zu können.⁵⁵

Auf diese Weise konnte auch Heisenbergs Matrizenmechanik und Schrödingers Wellengleichung, die sich in ihrer heuristischen Leistungen als äquivalent gezeigt hatten, in einen einheitlichen, übergreifenden Formalismus eingebettet werden. Schrödingers komplexe Wellenfunktion wird nun als ein ›Hilbertraum‹ betrachtet. Der Hilbertraum stellt eine abstrakte mathematische Konstruktion eines Vektorraums dar, der unendlich viele Dimensionen besitzt. Ein Vektor ist eine mathematische Größe, die eine Länge und eine Ausrichtung besitzt. Man kann Vektoren addieren und subtrahieren.

Anschaulich kann man sich einen Vektor als einen Pfeil mit einer bestimmten Ausrichtung vorstellen. Wenn man Vektoren um sich selbst dreht, erhält man einen Kreis. Formal begegnen wir hier wieder der Kreisfunktion, der wir mit den imaginären Zahlen bereits bei der Schrödinger-Gleichung begegnet sind. Zeigen zwei Vektoren in die gegensätzliche Richtung, so löschen sie sich aus, sind sie gleich ausgerichtet, so addieren sie sich. Auf diese Weise lassen sich mit Vektoren die Interferenzen von Wellenbeziehungen verrechnen.

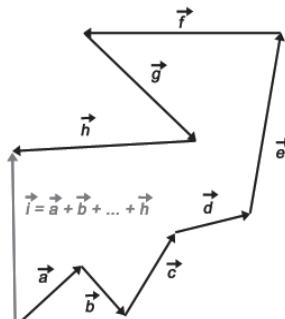


Abb.11: Vektoraddition und -subtraktion⁵⁶

⁵⁴ v. Neumann (1981 [1932]).

⁵⁵ v. Neumann arbeitete darüber hinaus lange Zeit im Rahmen der Hilbert'schen Beweistheorie, mit der beansprucht wurde, auf Basis der Logik die Mathematik durch sich selbst fundieren zu können. Dieses Projekt ist dann bekanntlich mit dem Unvollständigkeitssatz von Gödel hinfällig geworden (vgl. Hofstadter 1979).

⁵⁶ Quelle: Alexander Jung, download am 5.10.2012 unter http://www.rither.de/images/mathematik/lineare-algebra-und-analytische-geometrie/vektoren/vektoraddition-und-vektorsubtraktion/geometrisch_beispiel3.gif

Von Neumann hat nun erkannt, dass sich Quantenobjekte als Vektoren im Hilbertraum darstellen lassen. Hierbei werden n mal 6 Dimensionen benötigt. 3 Dimensionen ergeben sich aus den Raumkoordinaten, 3 weitere aus dem Spin, einer anderen Quanteneigenschaft.⁵⁷ Da jetzt noch mit der Anzahl der Objekte n multipliziert werden muss, ergibt sich schnell eine riesige Anzahl von Dimensionen, was jedoch den Mathematiker nicht stört, da der Hilbertraum auf unendlich viele Dimensionen hin angelegt ist. Für den Experimentalphysiker stellt sich bei komplizierteren Quantenobjekten jedoch das Problem, wie sich hinreichend genaue Näherungen berechnen lassen, die sich dann mit seinen Experimenten in Beziehung gesetzt werden können. In der zeitgenössischen Physik kann hierzu allerdings auf die Rechenleistungen von Computern zurückgegriffen werden, so dass selbst aufwendige Rechnungen nicht mehr als Hindernis erscheinen, um mathematische Modellierung und Experiment miteinander in Verbindung zu bringen.

Als Konsequenz einer stringenten mathematischen Argumentation konnte von Neumann nun zeigen, dass unter der Voraussetzung der Gültigkeit der quantentheoretischen Modellierung folgende drei Schlussfolgerungen gelten:

1. Die Heisenbergsche Unschärferelation ergibt sich als mathematische Konsequenz aus der Nichtvertauschbarkeit der jeweils korrespondierenden Operatoren, sie hängt also nicht von der begrenzten Fähigkeit ab, genau messen zu können.
2. Die Quantenmechanik lässt sich nicht mittels statistischer Näherungen auf Basis einer klassischen deterministischen Theorie erzeugen. Damit verbietet sich auch eine Theorie verborgener Variablen, die darauf beruht, Quantenteilchen durch Gesetzmäßigkeiten programmiert zu sehen, die unabhängig vom Kontext der Messung bestehen.
3. Einhergehend mit 1. und 2. widerspricht die Quantentheorie der Auffassung, dass die subatomaren Prozesse durch das Kausalitätsprinzip beschreibbar sind.

Auch nach »heutigen Maßstäben« wird Neumanns Arbeit als »abschließende Formulierung der Quantenmechanik« angesehen.⁵⁸ Mit von Neumann wird die Quantentheorie definitiv als eine nicht-klassische Theorie rekonstruiert. Sie erhält ihre Legitimation aufgrund

⁵⁷ Anschaulich kann man sich unter Spin die Rotation eines Teilchens im Raum um sich selbst vorstellen. Dies ist jedoch eine klassische Vorstellung, die auf einem Teilchenbild beruht.

⁵⁸ So etwa Mittelstaedt (2000, 65).

der inneren mathematischen Konsistenz und aufgrund der Tatsache, dass sie die einzige derzeit bestehende Theorie darstellt, die in der Lage ist, die experimentellen Befunde angemessen zu beschreiben:

»Die Quantenmechanik ist in ihrer heutigen Form gewiß lückenhaft, und es mag sogar sein, daß sie falsch ist, wenngleich dies letztere angesichts ihrer verblüffenden Leistungsfähigkeit beim Verständnis allgemeiner und der Berechnung spezieller Probleme recht unwahrscheinlich ist. Trotzdem die Quantenmechanik mit der Erfahrung glänzend übereinstimmt und uns die Einsicht in eine qualitativ neue Seite der Welt eröffnet hat, kann man doch niemals von einer Theorie sagen, sie sei durch die Erfahrung bewiesen, sondern nur, daß sie die beste bekannte Zusammenfassung derselben ist. Aber bei der Betrachtung aller dieser Kautelen dürfen wir doch sagen: Es gibt gegenwärtig keinen Anlaß und keine Entschuldigung dafür, von der Kausalität in der Natur zu reden – denn keine Erfahrung stützt ihr Vorhandensein, da die makroskopischen dazu prinzipiell ungeeignet sind, und die einzige bekannte Theorie, die mit unseren Erfahrungen über die Elementarprozesse verträglich ist, die Quantenmechanik, widerspricht ihr.«⁵⁹

In Hinblick auf die quantenmechanische Modellierung gilt nun, dass die Quantenlogik sowie die Quanten-Kausalität schwächeren Prinzipien folgen als es in der klassischen Physik üblich ist.⁶⁰ Insofern man die Quantentheorie als die fundamentalere physikalische Theorie ansieht, erscheint die Quantenlogik nicht mehr als eine ungenaue bzw. unvollständige Beschreibung einer an sich weiterhin den strengerem

59 v. Neumann (1932, 159 f.)

60 »Die allgemeinsten pragmatischen Vorbedingungen einer Wissenschaftssprache, die sich auf quantenmechanische Objekte und deren Eigenschaften bezieht, sind schwächer und ärmer an außersprachlichen Voraussetzungen als die Vorbedingungen einer Sprache der klassischen Physik. Diese unterschiedliche Stärke drückt sich dann insbesondere in der Logik aus. Die Logik der quantenmechanischen Sprache ist schwächer als die klassische Logik. Hier ist wieder eine direkte Übertragung in mathematische Strukturen möglich. Quantenlogik führt auf den aus dem Hilbert-Raum der Quantenmechanik bekannten, nur orthomodularen, aber nicht Booleschen Verband der Projektionsoperatoren, während die klassische Logik auf den Booleschen Verband der Teilmengen des klassischen Phasenraumes führt. Auch hier erweist sich die der Quantenphysik zugrunde liegende Logik-Struktur als schwächer und allgemeiner als die spezielle der klassischen Physik entsprechende klassische Logik. Etwas salopp ausgedrückt: Quantenlogik ist wahrer als klassische Logik« (Mittelstaedt 2000, 67).

Gesetzen der klassischen Logik folgenden Welt. Vielmehr stellt sich der Sachverhalt jetzt umgekehrt dar: Weil die physikalische Welt in ihren Tiefen unscharf und unbestimmt ist, erscheint die quantenmechanische Beschreibung als die exaktere Theorie der Wirklichkeit. Die dem Kausalprinzip folgende klassische zweiwertige Logik erscheint nun nur noch als ein Spezialfall, der unter bestimmten Randbedingungen auftritt.⁶¹

Für das Verhältnis zwischen klassischer und quantentheoretischer Beschreibung gilt nun also, dass die »allgemeinen ontologischen Prämissen, die der Quantenmechanik zugrunde liegen«, sich »von den entsprechenden Prämissen der klassischen Physik nicht dadurch« unterscheiden, »dass sie anders, sondern nur dadurch, dass sie schwächer sind«.⁶² Die Quantentheorie, so die hieraus folgende Implikation, liefert damit – um diesen wichtigen Befund nochmals zu wiederholen – keineswegs eine unvollständige, sondern eine ›realistischere‹ Interpretation der Wirklichkeit.⁶³

Die Quantentheorie erscheint aus der mit v. Neumann ausgearbeiteten Perspektive nicht unvollständig, weil sie mit Unbestimmtheiten und Unschärfen rechnet, im Gegenteil: die Fundierung unserer Welt auf Unbestimmtheiten und Unschärfen, die in ihren Beziehungen nun jedoch als verschränkt zu sehen sind, erscheint jetzt als das eigentliche Charakteristikum unserer physikalischen Wirklichkeit, da

61 »Quantenmechanische, statistische Kausalität ist schwächer als klassische Kausalität, die als ein selten realisierter Spezialfall erscheint, und der quantenmechanische Substanzbegriff ist schwächer als der klassische, da Quantenobjekte anders als klassische Objekte nicht Träger aller Eigenschaften sind. Die mathematische Präzisierung dieser Einsichten führt dann zu den bekannten quantenmechanischen Observablen- und Wahrscheinlichkeitsstrukturen, in denen die jeweiligen klassischen Strukturen als Spezialfälle enthalten sind« (Mittelstaedt 2000, 67).

62 Mittelstaedt (2000, 66).

63 Hierzu weiter Mittelstaedt: »Die makroskopische Welt ist [dann] nicht mehr der sichere Ort, von dem aus man unbehelligt die Seltsamkeiten der Quantenwelt studieren könnte, wie sich Niels Bohr das noch gedacht hat. Die Quantenphänomene sind überall. [...] Das ungelöste, heutige Problem ist vielmehr die klassische Physik selbst. Wie ist es möglich, dass es so etwas wie die uns vertraute, heile Welt der klassischen Physik überhaupt gibt? Auf diese Frage konnte eine überzeugende und befriedigende Antwort bislang nicht gefunden werden. – Wenn nicht ein völlig neues, aus heutiger Sicht überraschendes Erklärungsmodell für die klassische Welt gefunden wird, dann deutet sich eine, zumindest ontologisch sehr unschöne Lösung an: Die Welt der klassischen Physik könnte eine in allen praktischen Fällen bewährte, aber nur näherungsweise richtige Idealisierung, d. h. letztlich eine Illusion sein« (Mittelstaedt 2000, 67).

sich dies aus der konsequenten mathematischen Durchführung der Theorie ergibt.

Das Messproblem: Willkürliche Schnitte in der Welt

Die Fragen der physikalischen Anschauung und Interpretation der Quantentheorie rücken mit v. Neumanns Formalisierung in den Hintergrund. Im Vordergrund erscheinen jetzt vor allem die mathematische Ästhetik im Sinne von Einfachheit, Konsequenz und Schlüssigkeit, sowie die empirische Passung zwischen mathematischer Modellierung und physikalischem Experiment. Die Zustände von Quantenobjekten können jetzt durch ›Vektoren‹ in einem Hilbertraum beschrieben werden. Die Eintrittswahrscheinlichkeiten für ein Ereignis ergeben sich aus dem Absolutquadrat des inneren Produktes normierter Hilbert-Vektoren.⁶⁴ Auf diese Weise lässt sich auch in einer klassisch erscheinenden Welt erfolgreich mit Quantenobjekten Empirie betreiben, wobei die Messergebnisse eben durch eine schwächere Kausalität bestimmt zu sehen sind.

An dieser Stelle ist es wichtig, darauf hinzuweisen, dass v. Neumann in seiner mathematischen Rekonstruktion der Quantenmechanik davon ausgeht, dass die Schrödinger-Gleichung auch für die klassische Welt gilt – und damit prinzipiell für das ganze Universum. Das Messinstrument, mit dessen Hilfe Quantenobjekte beobachtet werden, ist aus dieser Perspektive ebenfalls quantentheoretisch zu beschreiben. Messgerät und untersuchtes Quantenobjekt sind also ebenfalls als verschränkt zu betrachten und entsprechend durch eine kombinierte Wellenfunktion darzustellen.

Sobald man jedoch anfängt, auch die Messvorgänge quantenmechanisch zu formulieren, ist nicht einzusehen,⁶⁵ warum man mit der Beschreibung beim Messprozess stehen bleiben sollte. Ebenso kann man nun auch die Umgebung des Messgerätes mit Mitteln der Quantentheorie beschreiben, dann aber auch die Menschen, welche den Versuch durchführen und die Ergebnisse beobachten, einschließlich der neurophysiologischen Prozesse ihrer Wahrnehmung usw. Die Frage, welcher Teil des Messprozesses den Schnitt in der Wellenfunktion auslöst, lässt sich dann jedoch aus prinzipiellen Gründen nicht mehr beantworten. Die quantenmechanische Beschreibung kann durch die Erweiterung der Basis immer weiter ausgedehnt werden. Analytisch gelangt man auf diese Weise nicht zu einem sinnvollen Ende. Theoretisch könnte man jetzt zwar von der Schrödinger-Gleichung

⁶⁴ Siehe zu einer ausführlichen Rekonstruktion einer abstrakten Quantentheorie v. Weizsäcker (1994, 332 ff.).

⁶⁵ Vgl. v. Weizsäcker (1994, 537).

des kompletten Universums ausgehen, doch hier würde sich nun das Problem stellen, warum sich in einer empirischen Wechselwirkung gerade diese und nicht eine andere Lösung als Eigenwert zeigt. Offensichtlich realisiert sich uns die Welt nicht als eine Überlagerung verschiedener Möglichkeitstendenzen, sondern als eine Phänomenologisierung diskreter Zustände (man erlebt Gegenstände nicht unscharf oder in Form zweier sich überlagernder Alternativen).

Der Mathematiker v. Neumann löst das Problem des infiniten Regresses durch die Setzung eines willkürlichen Schnittes, entsprechend dem die Wellenfunktion kollabiert, ohne dabei angeben zu brauchen, ob der gelegte Schnitt auch physikalisch einen Unterschied macht. Das Messproblem lässt sich dann entsprechend durch die Wahl eines jeweils definierten Bezugsrahmens in einer Weise bearbeiten, dass die Experimente im Sinne des Formalismus der Quantentheorie Sinn ergeben. Man wählt beispielsweise ein Objekt-System im Präparationszustand a und ein Messsystem im Zustand b. Nach der Messwechselwirkung entsteht dann ein gemeinsames System, das sich wiederum quantenmechanisch als Superposition, d. h. als Überlagerung verschiedener möglicher Eigenzustände beschreiben lässt. Entsprechend dem ‚Eigenwert-Eigenzustand-Link‘ haben wir jetzt wieder zwei mögliche Beschreibungsebenen: Solange sich das gemischte System in der Superposition verschiedener Eigenwerte befindet, kann der Messgröße kein definierter Wert zugeordnet werden. Schaut man jedoch auf den Zeiger des Messinstruments, so erhält man jeweils einen definierten Eigenzustand der Observablen. Man geht zwar jetzt von einer durch die Schrödinger-Gleichung beschreibbaren Verschränkung der Messprozedur mit dem zu messenden Quantenzustand aus – und erkennt hiermit die Wellenfunktion als real an –, doch sobald ein Messergebnis beobachtet wird, phänomenologisiert sich ein klassischer Zustand. Von Neumann bleibt damit der Kopenhagener Interpretation in der Weise treu, als er den unstetigen Übergang der Wellenfunktion zum beobachteten Eigenzustand weiterhin voraussetzen muss. Er sieht die Wellenfunktion zugleich aber ebenso als eine grundlegende physikalische Realität an.

Die schon bei Bohr und Heisenberg aufgeworfene Paradoxie des Welle-Teilchen-Dualismus bleibt zwar erhalten, wird aber hier umschift, indem man einen mathematischen Formalismus hat, mit dem sich rechnen lässt und mit dessen Hilfe man in Referenz zu der im Experiment gewählten Basis einen Schnitt setzen kann, über den die undefinierte Grenze zwischen der klassischen Beobachtung eines bestimmten Messergebnisses und der quantenmechanischen Beschreibung unterbestimmter Verhältnisse wieder eingeholt wird.

Carl Friedrich von Weizsäcker spricht in Hinblick auf v. Neumanns Werk nicht ohne Grund von einer »Machtübernahme der

Mathematik in der Quantentheorie“,⁶⁶ denn die innere Stimmigkeit seiner mathematischen Ausarbeitungen drängt die physikalischen und philosophischen Deutungsprobleme der Quantenmechanik in den Hintergrund. Aus mathematikinterner Perspektive kann man das gewählte Vorgehen beweisen und innerhalb der angewandten Physik kann man mit dem ausgearbeiteten Formalismus rechnen.

Versuche einer alternativen Deutung und Konzeptionalisierung der Quantentheorie können an dem hiermit hergestellten Status quo leicht abprallen. Warum sollte man eine funktionierende theoretische Konzeption überdenken oder gar neu konzeptionalisieren wollen, wenn sie mathematisch schlüssig ist und bislang durch die Daten der Experimentalphysik bestätigt wird? Im Gegenteil: Der Ansatz, Quantenphänomene als gekoppelte Vektoren eines Hilbertraums aufzufassen, lässt sich auf pragmatische Weise in eine Quantenfeldtheorie überführen. Zudem lässt sich eine Vielzahl der merkwürdigen Ergebnisse, die aus der Nichtvertauschbarkeit der Operatoren folgen, mittlerweile experimentell bestätigen (vgl. Kapitel III).

Die grundlegenden Paradoxien der Quantenmechanik sind mit der Mathematisierung des Problems durch v. Neumann zwar insofern beruhigt worden, als dass die Quantenphysiker nun eine Rechenpraxis zur Verfügung haben, mit der sich im Alltag problemlos arbeiten lässt. Die theoretischen Dilemmata der Quantenmechanik sind damit jedoch nicht verschwunden. Weder lässt sich der mit der Messung erzeugte Schnitt in der Welt erklären noch ist hiermit eine konzeptionelle Anschauung gewonnen, was die Quantentheorie eigentlich physikalisch bedeutet.

Deutlich wird dies insbesondere anhand zweier Gedankenexperimente, die beide von intimen Kennern der Quantentheorie formuliert wurden.

Das EPR-Gedankenexperiment: nicht-reale Welt oder unvollständige Theorie

Im Prinzip sind nach dem Formalismus der Quantentheorie zwei Teilchen, die irgendwann miteinander in Wechselwirkung treten und hierdurch quantenmechanisch verschränkt sind, dann aber räumlich getrennt wurden, weiterhin als miteinander verbunden zu betrachten. 1935 formulierten Einstein, Podolsky und Rosen in einem Artikel⁶⁷ den als EPR-Paradoxon bekannt gewordenen Einwand, nach dem die Quantenverschränkung zur Verletzung des klassischen Prinzips

⁶⁶ Weizsäcker (1994, 511).

⁶⁷ Einstein/Podolsky/Rosen (1935).

der lokalen Wirkungen führe und die Quantenphysik deshalb unvollständig sein müsse.

Das Gedankenexperiment, mit dem das Argument vorgetragen wurde, lässt sich etwa folgendermaßen beschreiben:⁶⁸ Man erzeugt durch bestimmte physikalische Prozesse (etwa radioaktiven Zerfall) zwei Teilchen A und B, die quantenmechanisch miteinander verschränkt sind. Wenn man nun bei A eine der beiden komplementären Messgrößen Impuls p_1 oder Ort q_1 bestimmen würde, so würde aus der Vertauschungsrelation und der hieraus folgenden Unbestimmtheitsrelation die Konsequenz folgen, dass man beide Variablen nicht gleichzeitig genau bestimmen kann. Durch die Verschränkung gilt aber entsprechend den Gesetzen der Quantenmechanik, dass die Bestimmung von p_1 von Teilchen A gleichzeitig p_2 von Teilchen B festlegt, was dann nach der Theorie bedeuten würde, dass man q_1 und q_2 nicht gleichzeitig genau bestimmen kann. Da man aber nun die Entscheidung, ob man bei Teilchen A zuerst den Impuls oder erst den Ort misst, erst kurz vor der Messung treffen kann, also zu einem Zeitpunkt, nachdem die Teilchen bereits getrennt wurden, dürfte die Messung an A die Eigenschaften des Teilchens B eigentlich nicht beeinflussen. Dies müsste aber entsprechend dem Formalismus der Quantenmechanik der Fall sein, also hätte man hier eine Verletzung des Prinzips der lokalen Wirkungen zu erwarten. Veranschaulichen wir uns die Problemlage anhand eines nicht physikalischen Beispiels:⁶⁹ Stellen wir uns zwei Kugeln vor, die in Hinblick auf ihre

68 Der Kern der Argumentation beruht auf dem mathematischen Sachverhalt der Nicht-Vertauschbarkeit von Operatoren. Konsequent durchgedacht führt dies zu der Annahme, dass entweder die Eigenschaft der verschränkten Variable als nicht ›real‹ zu betrachten ist oder eben die (mathematische) Formulierung der Quantentheorie unvollständig ist. In der Originalarbeit heißt es: »More generally, it is shown in quantum mechanics that, if the operators corresponding to two physical quantities, say A and B, do not commute, that is, if $AB \neq BA$, then the precise knowledge of one of them precludes such a knowledge of the other. Furthermore, any attempt to determine the latter experimentally will alter the state of the system in such a way as to destroy the knowledge of the first.

From this follows either (1) the quantum mechanical description of reality given by the wave function is not complete or (2) when the operators corresponding to two physical quantities do not commute cannot have simultaneous reality« (Einstein/Podolsky/Rosen 1935, 778).

69 Wohlgemerkt die Farben realer Kugeln sind makroskopische Eigenschaften, die (bislang) nicht in der dem EPR-Gedankenexperiment zugrunde liegenden Weise als verschränkte Quantenzustände erzeugt werden können.

Farbe miteinander verschränkt sind (dies heißt, erst wenn man hinschaut, entscheidet sich, welche von den beiden orange oder blau ist). Selbst wenn man die beiden Kugeln mehrere tausend Kilometer voneinander trennen würde, müsste entsprechend der Verschränkungsregel dennoch gelten, dass, sobald die Farbe der einen Kugel bestimmt wird, simultan die andere die Komplementärfarbe annimmt.

Einstein sprach in Bezug auf den in diesem Gedankenexperiment antizipierten Zusammenhang in polemischer Form von einer ›spukhaften Fernwirkung‹, die per se auszuschließen sei, und hielt nicht zuletzt auch aus diesem Grunde die Quantentheorie in der vorliegenden Form für eine unbefriedigende und unvollständige physikalische Beschreibung der Wirklichkeit.⁷⁰ Während die Quantentheorie mit der Kopenhagener Interpretation praktisch vorhersagt, dass die Eigenschaften der beiden verschränkten Teilchen A und B vor der Messung nur potenziell bestehen und sich erst mit der Messung eines der beiden Teilchen als ›real‹ phänomenologisieren, geht Einsteins Gedankenexperiment davon aus, dass die Teilcheneigenschaften unabhängig von einer Messung bestehen. Falls nämlich Letzteres nicht der Fall wäre, müsste in Kauf genommen werden, dass das eine der gemessenen Teilchen das jeweils andere spontan über die Messung informiert. Auf Basis klassischer physikalischer Mechanismen kann dies jedoch nicht erklärt werden. Man müsste nun auf vertrackte Beziehungen wie nicht-lokale Wechselwirkung, rückwärts laufende Kausalität, Splitting in mehrere Welten, Einfluss durch die Entscheidung, was gemessen wird, oder andere ungewöhnliche Erklärungen

⁷⁰ Auch für Niels Bohr kam, wie Albert und Galchen feststellen, die Vorstellung einer echten nicht-lokalen Wechselwirkung nicht in Frage: »Bohr ließ keinen Zweifel daran, dass er Einstein, Podolsky und Rosen in einem Punkt zustimmte: Selbstverständlich komme eine echte physikalische Nichtlokalität nicht in Frage. Die scheinbare Nichtlokalität sei nur ein Grund mehr, warum wir den altmodischen und im EPR-Artikel so offensichtlichen Anspruch aufgeben müssten, wir könnten aus den Gleichungen der Quantenmechanik ein realistisches Bild der Welt ablesen – also ein Bild dessen, was tatsächlich vor unserer Nase von einem Moment zum nächsten existiert. Bohr bestand praktisch darauf, dass wir die Welt nicht nur unscharf wahrnehmen, sondern dass es jenseits dieses schattenhaften und unbestimmten Bildes nichts Wirkliches geben kann.

Diese Antwort war eine seltsame philosophische Reaktion auf einen eindeutig naturwissenschaftlichen Einwand. Noch seltsamer war, dass sie umgehend zum offiziellen Standpunkt der theoretischen Physik erhoben wurde. Darüber weiter nachzudenken galt schon bald als Ketzerei. Die Physiker opferten damit ihren alten Anspruch, die wirkliche Beschaffenheit der Welt zu entdecken, und verbannten metaphysische Fragen für lange Zeit ins Reich der Fantasie« (Albert/Galchen 2009, 33).

zurückgreifen. Die einzige konsistente Alternative wäre hingegen, auf verdeckte Variablen zurückzugreifen. Die verschränkten Teilchen hätten dann also von vornherein bestimmte Werte, die zueinander in einer festgelegten Beziehung liegen. Diese Variante wäre aber, wie v. Neumann aufgezeigt hat, nicht mit dem mathematischen Formalismus der Quantentheorie vereinbar.

Einstein hat sein Leben lang mit der Quantenmechanik gehadert. Anders als viele andere Kritiker der Quantentheorie wusste Einstein sehr genau um ihre theoretische Anlage und die aus ihr folgenden Konsequenzen. Ebenso wusste er als intimer Kenner der mathematischen Formalismen, dass bislang keine befriedigende Alternative zur Quantentheorie formuliert werden konnte, welche die mit ihr einhergehenden Paradoxien vermeide. Das EPR-Gedankenexperiment zeigt auf, was man in Kauf zu nehmen hat, wenn man sich auf den quantentheoretischen Formalismus einlässt, bzw. dass man wichtige physikalische Anschauungen und Verständnisweisen aufzugeben hat, wenn man sich entscheidet, sie als der Weisheit letzten Schluss zu akzeptieren. Einstein hat aufgezeigt, dass es mit der Quantentheorie keine Rückkehr zu klassischen physikalischen Anschauungen geben kann und mit ihr der Traum von einer Welt der Physik, die sich durch Einfachheit auszeichnet, empfindlich gestört wird.

*Schrödingers Katze: Wellenfunktionen springen nicht,
sie verschwinden*

Wenngleich seine Arbeiten maßgeblich zur Entwicklung der Quantentheorie beigetragen haben, lehnte Schrödinger die Kopenhagener Deutung ab. Er fand die Vorstellung vom Kollaps der Wellenfunktion einfach absurd. Die Idee des Quantensprungs lief der Intuition zuwider, welche der Formulierung der Schrödinger-Gleichung zugrunde lag. Die Grundannahme seiner Lösung des Quantisierungsproblems bestand ja gerade darin, die Wellenfunktion ψ als real, das heißt als ein objektives, unabhängig von der Modellierung bestehendes Wellenfeld aufzufassen. Zudem lassen sich dem ›Superpositionsprinzip‹ folgend beliebige Quantenzustände miteinander verschränken, womit entsprechend auch die klassische Welt auf einer tieferen Ebene als eine Wellenfunktion beschrieben werden könnte. Mit dem Wellenkollaps kommt aber nun eine Asymmetrie in die Welt. Es entstehen Alternativen, die als Möglichkeiten mitgeführt werden müssen, bis eine Messung geschieht, die dann allerdings selbst wiederum quantenmechanisch als Wellengleichung beschrieben werden müsste, so dass die Alternativen eigentlich nicht wirklich verschwinden würden,

man es also auch in der makroskopischen Realität mit sich überlagernden Verhältnissen zu tun hätte.

Um zu zeigen, dass diese Annahmen in die Irre führen, und um seine eigene frühere Auffassung von der Wellengleichung zu korrigieren,⁷¹ hat Schrödinger im Jahr 1935 in einem Beitrag mit dem Namen »Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik«⁷² sein berühmtes Gedankenexperiment formuliert: In einer Kiste sitzt eine Katze. Darüber hinaus befinden sich in der Kiste ein radioaktives Präparat, eine Flasche Gift, ein Detektor für Radioaktivität und ein Mechanismus, der das Signal des Detektors in einen Hammerschlag umwandelt. Falls nun die radioaktive Substanz zerfällt, so wird der Detektor die entstehende Strahlung messen. Daraufhin wird der Hammermechanismus in Gang gesetzt, welcher die Flasche mit dem Gift zertrümmert und die Katze muss sterben. Die Menge der radioaktiven Substanz ist so gewählt, dass im Durchschnitt in einer Stunde einmal ein Zerfallsprodukt den Detektor erreicht. Öffnet der Versuchsleiter nun nach einer halben Stunde die Kiste, so stehen die Chancen etwa fünfzig zu fünfzig, die Katze lebend anzutreffen.

Da der radioaktive Zerfall jedoch einen quantenphysikalisch beschreibbaren Prozess darstellt, stellt sich der Sachverhalt darüber hinaus entsprechend der Kopenhagener Deutung folgendermaßen dar:

Bevor die Kiste geöffnet wird, ist die Katze weder tot noch lebendig, da ohne die Beobachtung die Wellenfunktion des radioaktiven Teilchens noch nicht zu einem diskreten Ereignis – dem Zerfall oder Nicht-Zerfall – kollabiert ist. Nach der Öffnung durch den Beobachter ist der Kollaps der Wellenfunktion entschieden, da erst mit dem Akt der Messung eine Entscheidung erzwungen wird. Nun ergibt sich aber eine Reihe von Fragen: Was ist mit dem ‚Bewußtsein‘ der Katze, kann sie die Entscheidung herbeizwingen, bevor der Versuchsleiter die Kiste öffnet? Wie verhält es sich, wenn der Versuchsleiter mit der geöffneten Kiste allein im Zimmer ist und seine Sekretärin im Nebenraum noch nichts von dem Versuchsergebnis weiß? Da sie die Katze noch nicht beobachtet hat, ist das Tier für sie entsprechend der Wellenfunktion weder lebendig noch tot. Diese Überlegung ließe sich in unendlicher Regression bis zum Beobachter des Beobachters des Beobachters des Beobachters etc. weiterführen. Das Gedankenexperiment erscheint dem gesunden Menschenverstand absurd, doch

⁷¹ Wie bereits geschildert, hatte Schrödinger ursprünglich die Hoffnung, dass die -Funktion im Sinne klassischer Wellenbeschreibungen verstanden werden könne. Die in dem Aufsatz von 1935 formulierte Position verfolgt jedoch einen vollkommen anderen, originär nicht-klassischen Pfad.

⁷² Schrödinger (1935).

es trifft genau den Kern jener paradoxen Verhältnisse, mit denen uns die Quantenphysik im Sinne der v. Neumannschen Fassung konfrontiert: Erst der beobachtete Messvorgang erzeugt durch den Akt der Beobachtung die Entscheidung darüber, was als Realität zu gelten hat. Diese Realität aber wiederum ist selbst quantenmechanisch zu beschreiben – und vor allen Dingen bleibt die Frage offen, was denn eigentlich physikalisch eine Beobachtung darstellt. Mit der Schrödinger-Gleichung, aber auch in der quantenmechanischen Reformulierung des Messproblems durch v. Neumann setzt sich die Verschränkung der Zustände grenzenlos über alle beteiligten makroskopischen Vorgänge hinweg fort (einschließlich der Körper von Katzen und Menschen).

Welche Perspektive kann nun Schrödinger selbst in Hinblick auf das Katzenparadoxon anbieten? Versuchen wir im Folgenden einige Schritte seiner Argumentation zu rekonstruieren, denn dies gibt uns faszinierende Einsichten in die offenen Enden der quantenmechanischen Theoriebildung.⁷³

In der Quantenmechanik werden die Variablen der klassischen Physik durch Operatoren ersetzt. Der hierdurch erhaltene Formalismus hat wesentlich weniger Freiheitsgrade als ein klassisch beschreibbares System, da aufgrund der Vertauschungsrelation die das System beschreibenden Operatoren miteinander konjugiert sind und durch die Verschränkung Freiheitsgrade verloren gehen.⁷⁴ Das Quantensystem ist in Hinblick auf die ›fehlenden Variablen‹ unbestimmt und die Wellenfunktion ψ gibt die Wahrscheinlichkeit an, bei einer Messung ein bestimmtes Resultat zu erhalten. Die ψ -Funktion beschreibt die deterministische Entwicklung der Wahrscheinlichkeiten mit der Zeit. Eine Messung stellt jedoch einen kritischen Übergang dar, denn von nun an weiß man das Ergebnis. Jetzt macht es keinen Sinn mehr, von einer Eintrittswahrscheinlichkeit zu sprechen, da jetzt Gewissheit über den Zustand besteht und die wiederholte Messung (ein zweites Mal auf den Zeiger schauen oder z. B. erneut den Weg bestimmen, den das Elektron genommen hat) keine neue Information erzeugt.

Die Vorhersagekraft der Quantentheorie ausschließlich auf statistische Aussagen reduzieren zu wollen, blendet jedoch einen we-

⁷³ Um ein tieferes Verständnis der Schrödingerschen Denkweise zu erlangen, empfiehlt es sich, den Artikel, in dem die Argumentation entfaltet wird, im Original zu lesen, da hier auch eine Reihe von erkenntnistheoretischen und philosophischen Perspektiven auf das Thema deutlich werden.

⁷⁴ »Der klassische Begriff des Zustandes geht verloren, indem sich höchstens einer wohl ausgewählten Hälfte eines vollständigen Satzes von Variablen bestimmte Zahlwerte zuweisen lassen« (Schrödinger 1935, 808).

sentlichen Teil ihrer physikalischen Erklärungsleistungen aus. Beispielsweise erlauben es die Planckschen Oszillatoren, über die sich die Atomspektren erklären lassen, sehr genaue Aussagen zu treffen, ohne sich dabei auf vorangehende Messungen berufen zu müssen. Diese erscheinen dann einfach als eine Reihe aus Vielfachen von $\pi h v$.⁷⁵ In vielen physikalischen Fragen zeigt sich die ψ -Funktion also als ein hochgradig präzises und theoretisch alternativloses Instrument zur Beschreibung von beobachtbaren Phänomenen.

All dies führt Schrödinger zu der Vermutung, dass die Wellenfunktion einen realen physikalischen Kern haben müsse und dass die übliche Fassung des Messproblems in die Irre führe, da man wesentliche Eigenschaften von Quantenobjekten nicht mehr als klassische Merkmalseigenschaften fassen könne.⁷⁶ Dabei stellt er zunächst fest, dass weder eine Erklärung über statistisch beschreibbare Gesamtheiten von Teilchenzuständen⁷⁷ noch die Vorstellung von verwaschenen Variablen hier weiterhelfen. Letztere stünden beispielsweise im Widerspruch zu den Befunden aus der Atomphysik, die quantenmechanisch nur dadurch erklärt werden könnten, indem eine reale, in das System eingelagerte Unschärfe angenommen wird, die Unbestimmtheit also

75 Schrödinger bemerkt zu diesem quantenmechanisch abgeleiteten Gesetz: Die »Aussage leidet wirklich nicht an einem übertriebenen Mangel an Präzision, ganz im Gegenteil, sie ist schärfer als eine wirkliche Messung je sein kann« (Schrödinger 1935, 810).

76 Hat man nicht »das Gefühl, daß der wesentliche Teil dessen, was gesagt werden soll, sich nur mit einiger Mühe zwängen läßt in die spanischen Stiefel einer Vorhersage über die Wahrscheinlichkeit, für eine Variable des klassischen Modells diesen oder jenen Meßwert anzutreffen? Hat man nicht den Eindruck, daß hier von grundlegenden Eigenschaften neuer Merkmalsgruppen die Rede ist, die mit klassischen nur noch den Namen gemein haben? Es handelt sich keineswegs um Ausnahmefälle, gerade die wahrhaft wertvollen Aussagen der neuen Theorie haben diesen Charakter« (Schrödinger 1935, 810).

77 »Um diese Aussage [in Hinblick auf die Werte eines Planckschen Oszillators] auf ein statistisches Konzept beziehen zu können, müßte die Statistik der Entfernung wenigstens nach oben hin scharf begrenzt sein durch diejenige Entfernung, bei der schon die potentielle Energie den Wert $3 \pi h v$ erreicht bzw. überschreitet. So ist es aber nicht, sogar beliebige Entfernungen kommen vor, wenn auch mit stark abnehmender Wahrscheinlichkeit. Und dies ist nicht etwa ein nebensächliches Rechenergebnis, das irgendwie beseitigt werden könnte, ohne die Theorie ins Herz zu treffen: neben vielen anderen gründet sich auf diesen Sachverhalt die quantenmechanische Erklärung der Radioaktivität« (Schrödinger 1935, 811).

nicht ein Messartefakt darstellt, sondern die Verhältnisse wirklich unbestimmt sein müssen.⁷⁸

Wie umkreist nun Schrödinger das Dilemma? Die Zuflucht zum naiven Positivismus, entsprechend dem die Messung bestimme, was »wirklich ist«, hilft für ihn nicht weiter, da die Quantentheorie selbst hochgradig von Theorie durchsetzt ist, also alles andere als ein Beispiel für reine Beobachtung darstellt. Dennoch bleibt das Problem des physikalischen Verständnisses bestehen. Man trifft jetzt zwar auf eine Theorie, die hochgradig erfolgreich ist, aber nun aufgrund ihrer Mathematik – und nicht aufgrund der Anschauung – diktieren, was Sache ist.⁷⁹ »Die Wirklichkeit widerstrebt der gedanklichen Nachbildung durch ein Modell.«⁸⁰

Schrödinger formuliert nun eine eigenständige, neue Interpretation der ψ -Funktion. Letztlich tue sie nichts anderes, als einen Katalog der Zukunftserwartung zu formulieren:

Mit ihr »ist die jeweils erreichte Summe theoretisch begründeter Zukunftserwartung verkörpert, gleichsam wie in einem Katalog niedergelegt. Sie ist die Beziehungs- und Bedingtheitsbrücke zwischen Messungen und Messungen, wie es in der klassischen Theorie das Modell und sein jeweiliger Zustand war. Mit diesem hat die ψ -Funktion nicht viel gemein. Sie wird, im Prinzip, eindeutig festgelegt durch eine endliche Zahl passend ausgewählter Messungen am Objekt, halb soviel, wie in der klassischen Theorie nötig waren. So wird der Katalog der Erwartungen erstmalig angelegt.

⁷⁸ Hier in Referenz auf das Katzenbeispiel: »Die ψ -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 sind. Das Typische an diesen Fällen ist, daß eine ursprünglich auf den Atombereich beschränkte Unbestimmtheit sich in grobsinnliche Unbestimmtheit umsetzt, die sich dann durch direkte Beobachtung entscheiden lässt. Das hindert uns, in so naiver Waise das »verwaschene Modell« als Abbild der Wirklichkeit gelten zu lassen. An sich enthielt es nichts Unklares oder Widerspruchsvolles. Es ist ein Unterschied zwischen einer verwackelten oder unscharf eingestellten Fotografie und einer Aufnahme von Wolken und Nebelschwaden« (Schrödinger 1935, 812).

⁷⁹ »Da wir aber nicht frisch auf die Welt kommen und unsere Wissenschaft neu aufzubauen beginnen, sondern einen ganz bestimmten Rechenapparat in Gebrauch haben, von dem wir uns seit den großen Erfolgen der Q.M. weniger denn je trennen möchten, sehen wir uns gezwungen, vom Schreibtisch aus zu diktieren, welche Messungen prinzipiell möglich sind, das heißt möglich sein müssen, um unser Rechenschema ausreichend zu stützen« (Schrödinger 1935, 823).

⁸⁰ Ebd., 824.

Von da verändert er sich mit der Zeit, genau wie der Zustand des Modells in der klassischen Theorie.« Die abrupte Veränderung durch die Messung »ist genau der Punkt, der den Bruch mit dem naiven Realismus verlangt. Aus diesem Grund kann man die ψ -Funktion nicht direkt an die Stelle des Modells oder des Realdings setzen. Und zwar nicht etwa, weil man einem Realding oder einem Modell nicht abrupte unvorhergesehene Änderungen zumuten dürfte, sondern weil vom realistischen Standpunkt die Beobachtung ein Naturvorgang ist wie jeder andere und nicht per se eine Unterbrechung des regelmäßigen Naturverlaufs hervorrufen darf.«⁸¹

Die hier vorgestellte Perspektive ist erstaunlich. Rekapitulieren wir deshalb die zentralen Begriffe der Interpretation: Die Zukunftserwartungen entsprechen den möglichen Zuständen, welche mit der ψ -Funktion gegeben sind. Der Begriff des Katalogs impliziert, dass es eine begrenzte Zahl von Optionen gibt, die eingenommen werden können. Erwartungen sind normalerweise keine Begriffe der Physik, sondern sind als grundlegender Bestandteil eines kontingenzttheoretisch gefasstem Sinnbegriffs in Philosophie und Soziologie anzutreffen.⁸² Schrödinger entwickelt hier eine Deutung der Quantentheorie, die radikal von einem mathematischen Determinismus der Welt abweicht und stattdessen eine Protoform von Sinn in die Physik einführt. Er folgt hierin dem bahnbrechenden Pfad Plancks, der ja mittels einer informationstheoretischen Fassung der Entropie die Quantisierungsbeziehung hergeleitet hatte. Dies bedeutet aber dann auch, dass nur ein begrenztes Maß an Information in einem System stecken kann. Diese Deutung steht wiederum im Einklang mit den im Quantenformalismus aufgrund der nicht-vertauschbaren Operatoren eingeschränkten Freiheitsgraden.

Die entscheidende Idee von Schrödinger besteht nun darin, dass eine Messung einen bestimmten Katalog von Erwartungen konstituiert (der dann aufgrund des begrenzten Informationsgehaltes sowohl bestimmte als auch unbestimmte Elemente enthalten muss). Diesem Katalog entspricht eine ψ -Funktion. Eine weitere Messung fügt, insofern sie dasselbe misst, dem System nichts Neues an Information hinzu. Die Erwartung ist durch den bereits gemessenen Wert zu hundert Prozent bestimmt. Eine neue Beobachtung, eine andere Messung konstituiert damit jedoch eine neue ψ -Funktion, also einen anderen Katalog von Zukunftserwartungen, der wiederum an die mit der vorangegangen Messung generierten Erwartungshorizonte anknüpft.

81 Ebd., 823f.

82 Vgl. Luhmann (1993, Kap. »Sinn«).

Auf diese Weise wird ein sukzessives Voranschreiten von Messung zu Messung, von Beobachtung zu Beobachtung möglich, wobei von Schritt zu Schritt eine neue ψ -Funktion emergiert.

Nun führt Schrödinger seine Argumentation mit einem weiteren, entscheidenden Schritt fort. Da durch die Operatorbeziehungen nur begrenzte Freiheitsgrade der prinzipiell definierbaren Variablen vorhanden sind, lässt sich die Beziehung zwischen zwei aufeinanderfolgenden ψ -Funktionen nicht einfach durch einen Zugewinn von Information beschreiben, sondern es muss zugleich immer auch Information verloren gehen.

»Daher müssen, wenn die ψ -Funktion eines Systems sich verändert, in der neuen Funktion stets auch Aussagen fehlen, die in der früheren enthalten waren. Im Katalog können nicht bloß Neueintragungen, es müssen auch Streichungen stattgefunden haben. Nun können Kenntnisse wohl erworben, aber nicht eingebüßt werden. Die Streichungen heißen also, daß die vorhin richtigen Aussagen jetzt falsch geworden sind. Eine richtige Aussage kann bloß falsch werden, wenn sich der Gegenstand verändert, auf den sie sich bezieht.«⁸³

Das neu entstehende System ist damit nicht mehr dasselbe, da die Konfiguration zwischen bestimmten und unbestimmten Variablen eine andere ist. Wohlgemerkt: Der quantentheoretische Formalismus erzwingt, dass die Hälfte der Variablen unbestimmt bleibt. Ein Informationsgewinn durch eine Messung oder Beobachtung geht entsprechend nolens volens mit einem Informationsverlust an anderer Stelle im System einher.

Wenn man bereit ist, der Argumentation bis hierher zu folgen, lässt sich das Gesagte mit Schrödinger auch auf Verhältnisse zwischen mehreren Systemen übertragen. Wie bereits v. Neumann herausstellt, kann prinzipiell nicht nur das Messobjekt, sondern auch das Messinstrument als ein Quantensystem beschrieben werden. Insofern man die mit der Schrödinger-Gleichung modellierten Wirklichkeiten als ›real‹ auffasst, ist dieser Schritt sowieso zwingend.⁸⁴

83 Schrödinger (1935, 825).

84 Homolog zu Luhmanns vieldiskutiertem Diktum »Die folgenden Überlegungen gehen davon aus, daß es Systeme gibt« (Luhmann 1993, 30), müsste man also hier mit Schrödinger sagen: Wir gehen davon aus, dass es Quantensysteme gibt. Auch hier brauchen wir eine Setzung, ein Postulat, um überhaupt mit der Quantentheorie weiter arbeiten und ihre Funktionsweise weiter erkunden zu können. Die Alternative bestände darin, sie nur als heuristisches Prinzip für Vorhersagen zu verwenden. Hierzu

Wenn wir jetzt zum Beispiel vereinfachend annehmen, dass wir nur zwei Quantensysteme haben, nämlich das Quantenobjekt, an dem die Messung ausgeführt wird, und das Messsystem, welches nun auch quantentheoretisch zu beschreiben ist, dann haben wir für beide eine ψ -Funktion mit entsprechendem Katalog. Mit der Messinteraktion verschränken sich jetzt die beiden Systeme und für das Gesamtsystem kann entsprechend ein neuer Katalog von Zukunftserwartungen formuliert werden.

Da aber die beiden Systeme, sobald sie miteinander wechselwirken, auch noch Beziehungen zueinander eingehen können, ist ein Katalog zu erstellen, in dem die möglichen Beziehungen der Interaktion zwischen den beiden (Teil-)Systemen aufgeführt werden. Allerdings stellt sich nun rechnerisch der Sachverhalt so dar, dass der neue Katalog, der aus den beiden verschränkten Systemen besteht, mehr Freiheitsgrade besitzen müsste als die Summe der Freiheitsgrade der beiden noch nicht in Beziehung zueinander stehenden einzelnen Systeme. Man hat jetzt auch die möglichen Intersystembeziehungen mit zu berücksichtigen und entsprechend hinzuzuaddieren. Dies steht jedoch im Widerspruch zu der Grenze für die maximal möglichen Freiheitsgrade. Diese sind durch den quantentheoretischen Formalismus prinzipiell beschränkt.

Entsprechend kommt Schrödinger zu der Schlussfolgerung, dass die Verschränkung der beiden Systeme nicht nur neue Beziehungsoptionen konstituiert, sondern zugleich welche vernichtet bzw. auslöscht. Damit ist aber das neue System nicht einfach nur die Summe seiner Teile und seiner Interaktionsmöglichkeiten, sondern auf fundamentale Weise ein anderes. Wir treffen gleichsam auf eine neue Welt.⁸⁵

Hiermit begegnen wir der merkwürdigen Konsequenz, dass die »Kenntnis von einem Gesamtsystem« nicht »notwendig maximale Kenntnis aller seiner Teile« einschließt, denn es »kann nämlich sein, daß ein Teil dessen, was man weiß, sich auf Beziehungen oder Be dingtheiten zwischen den zwei Teilsystemen bezieht«.⁸⁶ Oder anders

ist allerdings die Erklärungskraft der Quantentheorie viel zu stark.

85 »1. Das Springen des Erwartungskatalogs bei der Messung ist unvermeidlich, denn wenn das Messen irgendeinen Sinn behalten soll, so muß nach einer guten Messung der Meßwert gelten. 2. Die sprunghafte Änderung wird sicher nicht von dem sonst geltenden zwangsläufigen Gesetz beherrscht, denn sie hängt vom Meßwert ab, der unvorhergesehen ist. 3. Die Änderung schließt (wegen der ›Maximalität‹) bestimmt auch Verlust an Kenntnis ein, Kenntnis ist unverlierbar, also muß der Gegenstand sich verändern – auch bei sprunghaften Änderungen und bei ihnen auch in unvorhergesehener Weise, anders als sonst« (Schrödinger 1935, 826).

86 Ebd., 826.

herum: »Bestmögliches Wissen um ein Ganzes schließt nicht notwendig das Gleiche für seine Teile ein«.⁸⁷

Wir treffen hier auf die ›System-im-System-Paradoxie‹. Die Problemlage, die hier aufscheint, ist mehr als nur eine Spiegelung in der Spiegelung, geht tiefer als jene rekursiven Problematiken, die dadurch entstehen, dass man die »Exowelt« nur aus der »Endoperspektive« erkunden kann.⁸⁸ Über diese Rekursivitäten hinausgehend⁸⁹ geht es hier zudem immer auch noch um die Verwobenheit von Bestimmtheit und Unbestimmtheit, der Verschränkung von Wissen und Nicht-Wissen.

Die Quantentheorie postuliert beschränkte Freiheitsgrade und damit beschränkte Möglichkeiten des Wissens. Systeme sind über ihre Zwischenbeziehungen miteinander verschränkt, wobei jedoch aufgrund der begrenzten Freiheitsgrade diese Beziehungen wiederum als kontingent zu sehen sind. Diese Kontingenz wiederum ist die Bedingung der Möglichkeit, dass überhaupt Systeme in Form separierbar erscheinender Einheiten identifiziert werden können – nämlich als ein bestimmter Systemzusammenhang, der als eine ausgeflaggte konkrete Beobachtung eben so und nicht als ein anders bestimmter (gemessener oder beobachteter) Zusammenhang erscheint. Der System-im-System-Zusammenhang der verschränkten ψ -Funktion erscheint nun als ein dynamisches Feld, das in seinen Möglichkeitshorizonten Trennung und Verschränkung in unterschiedlichen Kombinationen realisieren kann:

»Bloß im vorliegenden Fall, weil das Gesamtsystem aus zwei völlig getrennten Teilen bestehen soll, hebt sich die Sache als etwas Besonderes ab. Denn dadurch bekommt es einen Sinn, zu unterscheiden zwischen Messungen an dem einen und Messungen an dem anderen Teilsystem. Das verschafft jedem von ihnen die volle Anwartschaft auf einen privaten Maximalkatalog; andererseits bleibt es möglich, daß ein Teil des erlangbaren Gesamtwissens auf Konditionalsätze, die zwischen den Teilsystemen spielen, sozusagen verschwendet ist und so die privaten Anwartschaften unbefriedigt lässt – obwohl der Gesamtkatalog maximal ist, das heißt obwohl die ψ -Funktion des Gesamtsystems bekannt ist.«⁹⁰

⁸⁷ Ebd., 827.

⁸⁸ So Rössler (1992).

⁸⁹ Selbstbezüglichkeiten lassen sich in vielen Fällen auch durch klassische Mittel beschreiben, man denke etwa an die Pendelschwingung oder fraktionale Geometrie der Chaostheorie. Mit der Quantentheorie tritt jedoch ein neues Moment in die Beschreibung ein – die konstitutionelle Unbestimmtheit.

⁹⁰ Schrödinger (1935, 826).

Unter den benannten Voraussetzungen ist es wenig sinnvoll, davon zu sprechen, dass ein Objekt oder ein System einen Sprung macht, denn diese Vorstellung würde noch dem räumlichen Bild einer Zustandsbewegung folgen. Ebenso wenig ergibt es aber Sinn, die Systementwicklung als einen kontinuierlichen Prozess zu beschreiben, denn es gibt keine Kontinuität im Sinne von Trajektorien, welche im Sinne eines Zustandswechsels durchlaufen werden:

»Von der Form, in der man die ψ -Funktion zuletzt gekannt, zu der neuen, in der sie wieder auftritt, führt kein stetiger Weg – er führt eben durch die Vernichtung. Kontrastiert man die zwei Formen, so erscheint die Sache als ein Sprung. In Wahrheit liegt ein wichtiges Geschehen dazwischen, nämlich die Einwirkung der zwei Körper aufeinander, während welcher das Objekt keinen privaten Erwartungskatalog besaß und auch keinen Anspruch darauf hatte, weil es nicht selbstständig war.«⁹¹

Hiermit kommt die Zeit in einer nicht trivialen Weise mit ins Spiel. Auf einer tiefen Ebene erscheint Zeit nun synonym mit dem Wechsel, der Aufhebung und der Neukonstitution von Verschränkungen, also dem Auf- und Abbau der Zuordnung von bestimmten und unbestimmten Variablen:

»Die Verschränkung ist nicht zeitbeständig. Sie bleibt zwar dauernd eine eindeutige Verschränkung aller Variablen, aber die Zuordnung wechselt.«⁹²

Schrödingers Argumentation folgend zeigt sich das entscheidende Missverständnis der Kopenhagener Deutung darin, unterschiedliche Systeme als dieselben auffassen zu wollen. Die Antinomien der Kopenhagener Deutung erscheinen für ihn sozusagen jetzt als ein Artefakt einer Theorie, die durch ihren Formalismus eine Differenz zu einer Einheit zusammenbringt.⁹³ Schrödinger vermutet, dass das

91 Ebd., 828.

92 Ebd., 847.

93 »Die merkwürdige Theorie des Messens, das scheinbare Umspringen der ψ -Funktion und schließlich die ›Antinomien der Verschränkung‹ entstehen alle aus der einfachen Art, in welcher der Rechenapparat der Quantenmechanik zwei getrennte Systeme gedanklich zu einem einzigen zusammenzufügen erlaubt; wofür er geradezu prädestiniert scheint. Wenn zwei Systeme in Wechselwirkung treten, treten, wie wir gesehen haben, nicht etwa ihre ψ -Funktionen in Wechselwirkung, sondern die hören zu existieren auf und eine einzige für das Gesamtsystem tritt an ihre Stelle. Sie besteht, um das kurz zu erwähnen, zuerst einfach aus

Grundproblem möglicherweise damit zusammenhängt, die Abfolge der Zeit als kontinuierliche Abfolge von Zeitpunkten aufzufassen. Möglicherweise sei die Zeit selbst unscharf zu fassen, was jedoch durch die gegenwärtige Formulierung der Quantentheorie nicht geleistet werden könnte.

Schrödinger selbst lehnte die Idee des Quantensprungs, wie bereits gesagt, vehement ab. Dies führte zu einem Bruch zwischen ihm und der Gruppe der Physiker, welche die Entwicklung der Quantentheorie maßgebend weiter vorangetrieben haben. Laughlin spricht hier gar von einem »brutalen intellektuellen Mobbing« gegenüber Schrödinger,⁹⁴ und auch Cushing verwendet mikropolitische Konzepte, um die Dominanz der Kopenhagener Schule zu erklären.⁹⁵ Solche politischen oder gruppendiffusiven Erklärungen erkennen jedoch die Tatsache, dass Schrödinger selbst keine befriedigende formale Lösung als Alternative vorlegen konnte, wie die aufscheinenden Paradoxien der Quantentheorie gelöst werden können. Wir stoßen hier auf das Problem der Irreversibilität der Messung im Kontext der auf ein reversibles Verständnis von Zeit angelegten Schrödinger-Gleichung.

Was eine Wellenfunktion bedeutet, die imaginäre Dimensionen beinhaltet und deren Amplituden-Absolutquadrate statistische Aussagen über das Messergebnis erlauben, ist eine Frage, die Schrödinger selbst nicht auf weniger paradoxe Weise beantworten konnte als v. Neumann mit seinem Rückgriff auf die Kopenhagener Interpretation. Dass Schrödinger aus guten Gründen an der Intention festhielt, die Materie als Überlagerung von Wellen zu beschreiben, ist eine Sache, der Versuch jedoch, ein tieferes Verständnis des Messproblems unter Voraussetzung von ›Wellen aus nichts‹ zu gewinnen, eine andere, wie Fischer feststellt:

dem Produkt der zwei Einzelfunktionen; welches, da die eine Funktion von ganz anderen Veränderlichen abhängt als die andere, eine Funktion von allen diesen Veränderlichen ist oder ›in einem Gebiet mit viel höherer Dimensionszahl spielt‹ als die Einzelfunktionen. Sobald die Systeme aufeinander einzuwirken beginnen, hört die Gesamtfunktion auf, ein Produkt zu sein, und zerfällt auch, wenn sie sich wieder getrennt haben, nicht zu Faktoren, die sich den Systemen einzeln zuweisen ließen. So verfügt man vorläufig (bis die Verschränkung durch eine wirkliche Beobachtung gelöst wird) nur über eine gemeinsame Beschreibung der beiden in jenem Gebiet von höherer Dimensionszahl. Das ist der Grund, weshalb die Erkenntnis der Einzelsysteme auf das Notdürftigste, ja auf null herabsinken kann. Bestmögliche Erkenntnis eines Ganzen schließt nicht bestmögliche Erkenntnis seiner Teile ein – und darauf beruht doch der ganze Spuk« (Schrödinger 1935, 848 f.)

⁹⁴ Laughlin (2008, 46).

⁹⁵ Cushing (1994).

»Wie gesagt, es gibt dicke Bücher über das Leben und Sterben von Schrödingers Katze. [...] Doch darf man ihre wichtigste Vorgabe nicht übersehen, und genau dies hat Schrödinger mit seinem Bild der eingesperrten und bedrohten Katze getan: Seine eigene Gleichung beschreibt ja gerade nicht etwas aus der physikalischen Wirklichkeit, zum Beispiel keine Katze in einem Kasten. Schrödingers Gleichung stellt vielmehr eine symbolische Fassung der Realität dar, die sich in einer mathematischen Welt mit imaginären Dimensionen befindet. Eine Katze gibt es in diesen Sphären nicht, weder eine lebendige noch eine tote. Verrückt ist nicht Schrödingers Gleichung, verrückt ist die Tatsache, dass jemand diese Gleichung finden konnte und dass sie – nach Anwendung einer präzisen Vorschrift – die Wirklichkeit nachprüfbar als Wahrscheinlichkeit erfasst.«⁹⁶

Schrödingers Kritik am Wellenkollaps ist damit keineswegs erledigt. Doch es fehlten ihm die konzeptionellen (und durchaus auch die institutionellen) Ressourcen, mit denen er der damaligen physikalischen Gemeinde alternative physikalische Anschauungsweisen hätte plausibel machen können.

Schrödingers Interventionen weisen sozusagen auf das zugrunde liegende Paradoxon hin, waren jedoch damals nicht geeignet, es in einer befriedigenden Weise ruhigzustellen. Verbunden mit Stichworten wie ›emergence‹ und ›decoherence‹ lassen sich demgegenüber heute einige konzeptionelle und semantische Perspektiven aufzeigen, welche den Übergang zwischen klassischen Phänomenen und einer Weltbeschreibung durch die Schrödinger-Gleichung weicher und weniger unvereinbar erscheinen lassen (vgl. Kapitel IV).⁹⁷

Die Kritik kann nicht das Kritisierte ersetzen

Es ist leicht, Einsteins Widerstand gegenüber der Kopenhagener Ausarbeitung der Quantentheorie, sein Beharren auf einer alternativen theoretischen Konzeption, der Sturheit eines alternden Mannes zuzurechnen, der nach dem Exil in die USA seine geistige Spannkraft verloren hat.⁹⁸ Auch fällt es nicht schwer, Schrödinger Kauzigkeit oder einfach nur borniertes Festhalten an der Idee der Materiewellen

96 Fischer (2010, 138).

97 Auch hier wird sich zeigen, dass die zugrunde liegende Paradoxie nicht aufgehoben wird, man aber das Problem an andere Stellen – beispielsweise in die Kosmologie – verschieben kann.

98 So etwa auch Murray Gell-Mann (1994, 194).

vorzuwerfen, zumal offenbar die anderen Physiker sehr wohl den Dialog mit ihm gesucht hatten.⁹⁹

Ebenso leicht lässt sich umgekehrt auf die mikropolitischen Verhältnisse einer kleinen physikalischen Gemeinde hinweisen, die auch im Sinne ihrer eigenen Karriereinteressen keine Häresie zulässt und ihr Paradigma gegenüber Kritikern auch mit unlauteren Mitteln verteidigt.¹⁰⁰

Doch sowohl die psychologisierende als auch die politisierende Erklärung greifen zu kurz. Das Problem, mit dem die theoretische Physik der 20er- und 30er-Jahre konfrontiert wurde, ist komplexer. Mit der Quantentheorie liegt eine Konzeption vor, die offensichtlich in der Lage ist, eine Vielzahl subatomarer Prozesse angemessen zu beschreiben. Dass dies nur in Form von Wahrscheinlichkeitsaussagen möglich ist, stellt an sich kein Problem dar. Die Schwierigkeit liegt vielmehr darin, dass mit der Quantentheorie eine mathematische Modellierung vorliegt, die scheinbar im Widerspruch zur klassischen Auffassung physikalischer Realität steht. Hierdurch entstehen Paradoxien, die das Konzept der Kausalität sowie die Subjekt-Objekt-Dichotomie durcheinanderbringen. Jede Interpretation der Quan-

99 Hierzu gibt es einige Anekdoten, die um Details eines Aufenthalts Schrödingers in Kopenhagen kreisen. Hier die Version von v. Weizsäcker: »Schrödinger sollte erklären, warum das Elektron, das er im Atom als Welle beschrieb, außerhalb des Atoms offenkundig als Teilchen beobachtet wird (einzelne Szintillationen, Zählrohrausschläge, Wilsonkammer-Bahnen). Er sagte: ›Daraus, daß die Leute in Kleidern in die Badeanstalt hineingehen und in Kleidern herauskommen, folgt nicht, daß sie drinnen auch Kleider anhaben.‹ Aber das Argument bewies zu wenig. Wenn es in Wirklichkeit nur das Elektronenfeld gab, hätte er zeigen müssen, was die ›Kleider‹ sind, die es außerhalb des Atoms in Form von Teilchen auftreten lassen. Er faßte das Elektron als ein Wellenpaket auf und bewies, daß im harmonischen Oszillator ein Wellenpaket unbegrenzt zusammenhält. Aber Heisenberg zeigte, daß dies nur an dem äquidistanten Energiespektrum des harmonischen Oszillators lag. Normalerweise laufen Wellenpakete irreversibel auseinander.

Bei einem denkwürdigen Besuch Schrödingers in Kopenhagen im Herbst 1926 kam all dies zur Sprache. Schrödinger bekam eine Grippe und wurde von Bohr und seiner Frau, bei denen er lebte, hingebend gepflegt. Wenn man aber die Tür zu Schrödingers Krankenzimmer öffnete, sah man Bohr auf dem Bettrand sitzen und auf Schrödinger einreden: ›Aber Schrödinger, Sie müssen doch zugeben, daß ...!‹ Bei der Abreise soll Schrödinger gesagt haben: ›Wenn die verdammte Quantenspringerei doch wieder anfangen soll, dann tut es mir leid, die ganze Theorie gemacht zu haben.‹« (v. Weizsäcker 1994, 494 f.).

100 Hier wieder der Verweis auf Cushing (1994).

tenmechanik legt jeweils einen spezifischen Schnitt in die Welt, der von einer anderen Perspektive als contingent und fraglich gegenbeobachtet werden kann. Während die klassische Physik die Subjekt-Objekt-Dichotomie stabilhalten kann, wird in der Quantenphysik die Frage, wie der Schnitt gelegt wird, also wie beobachtet wird, virulent. Damit wird auch die Frage ihrer Interpretation contingent, das heißt beobachterabhängig.

Schrödinger und Einstein legen die Finger in die Wunden und verweisen auf die offenen Enden der Quantenphysik.¹⁰¹ Dies ist in Hinblick auf die Sinngenese verstörend und leitet Bewegungen ein, die Unruhe, die Komplexitätlasten und die hiermit verbundenen Sinnkrisen der Physik abzumildern. Mit der mathematischen Fundierung durch v. Neumann ist die Paradoxie insofern beruhigt, als dass man mit der Quantenmechanik im Alltagsgeschäft des Physikers rechnen kann. Die Paradoxie ist damit zwar nicht aufgehoben, doch weil die Kritik das Kritisierte nicht ersetzen kann, hebelt der Verweis auf ihre Widersprüche nicht die Theorie als solche aus.

An dieser Stelle lässt sich deshalb die Hypothese aufstellen, dass gerade der Rückbezug auf die mathematische Form und der Verzicht auf eine physikalische Anschauung die Paradoxie zunächst beruhigen konnte.

Gerade die »Machtübernahme der Mathematik in der Quantentheorie« (Weizsäcker)¹⁰² stellt aus dieser Perspektive eine praktikable Lösung dar, um den epistemischen und ontologischen Verunsicherungen begegnen zu können, die mit der Quantentheorie aufgeworfen worden sind. Der Trick, die besondere Form der Entparadoxisierung, die hiermit geleistet wird, impliziert gleichsam ein ›Verstehen, ohne wirklich verstehen zu müssen‹. Sie ermöglicht einen Rückzug in eine formale Welt, die nicht durch Begriffe und Semantik gestört wird und sich deswegen gegenüber einer Kritik immunisiert, die sowieso nur noch metaphysische Fragen aufwerfen könnte.

Schon zu Beginn der Quantentheorie begegnen wir den Hochabstraktionen einer physikalischen Theorie, die sich von ihrer Tradition her nur auf Anschauungen gründen kann, diese jedoch zu überwinden hat, um sich selbst als Projekt in neue theoretische Dimensionen voranzutreiben. Die Entstehung der Quantentheorie erscheint hiermit vor allem als eine gelungene Koproduktion zwischen Mathematik und Physik, in der jeweils die eine Sphäre die andere vor zu schneller

¹⁰¹ »Was wir dank Schrödinger wissen, hält uns weiter im Bewußtsein, was wir nicht wissen. Denn die Welt bleibt trotz aller erreichten Lösungen komplex, und Schrödingers Texte insbesondere schärfen durch jede neue Lösung das Bewußtsein für Ungelöstes« (Gumbrecht 2008, 19).

¹⁰² Weizsäcker (1994, 511).

Dekonstruktion bewahrt. Wenn die Mathematik beweisbar ist und die Experimente funktionieren, dann lassen sich Widersprüche und Paradoxien soweit zurückstellen, dass man weitermachen kann. Wie bereits gesagt: Der Rückgriff auf Verfahren, die als ›Befriedungsstrategien‹ funktionieren (›man hat es doch ausführlich in den Solvay-Konferenzen durchgesprochen‹) oder gar die ritualistische Schließung der Debatte durch die den damaligen Diskurs dominierenden Physiker werden hier nicht abgestritten. Im Sinne einer funktionalen Analyse sehen wir jedoch in diesen Prozessen nicht die (alleinige) Ursache für bestimmte Entscheidungen der Theorieentwicklung, sondern nehmen den Befund, dass der Rückgriff auf solche Strategien in hohem Maße attraktiv erscheint, als ein zentrales Symptom der inneren Bezugsprobleme der Theorieentwicklung. Erst wenn man mit dem Begründen nicht weiterkommt, werden andere, außerhalb der wissenschaftlichen Diskursethik liegende kommunikative Strategien attraktiver.

Die Quantentheorie bringt uns in Verbindung mit der Paradoxie des Beobachters. Hiermit erscheint zugleich die Problematik von Sinn, nämlich dass eine Beobachtung zugleich bezeichnet und unterscheidet und damit einen blinden Fleck erzeugt, der wiederum andere Beobachter herausfordert, das zu sehen, was mit der ersten Beobachtung nicht gesehen werden kann. Dass die hiermit verbundenen Dilemmata der Quantentheorie nicht aufgehoben sind, wird in den folgenden Kapiteln deutlich, mit denen die weitere Entwicklung der Quantentheorie rekonstruiert wird.

Zusammenfassung: Entstehung einer nicht-klassischen physikalischen Theorie

In diesem Kapitel wurde versucht, die Bezugsprobleme der physikalischen Theoriebildung nachzuzeichnen, die schließlich im ersten Drittel des 20. Jahrhunderts zur Entwicklung der Quantentheorie geführt haben. Den Physikern wurde damals immer deutlicher, dass sich die Verhältnisse im subatomaren Bereich nicht mehr auf Basis der bestehenden physikalischen Modelle beschreiben lassen.¹⁰³

Der entscheidende Durchbruch zur Quantentheorie gelang 1926 mit der Schrödinger-Gleichung und der Heisenbergschen Matrizenmechanik. Mit Hilfe des neuen mathematischen Formalismus wurde es möglich, das Dilemma der Unvereinbarkeit von Wellen- und Teilchenmodell gleichsam zu umgehen, indem die empirisch beobachtbaren gequantelten Verhältnisse jetzt als ein Eigenwertproblem der

¹⁰³ Gemeint sind hier Systeme von Differenzialgleichungen, in denen von stetigen Veränderungen von Kräften und Wirkungen ausgegangen wird.

Wellenfunktion ψ erscheinen. Mit der gefundenen Lösung ließ sich nicht nur auf Anhieb eine Vielzahl empirisch gegebener Problemlagen erklären (Atomspektren, Fotoeffekt, Doppelspaltexperiment etc.), sondern auch in überzeugender Weise die Atomphysik sowie die Grundlegung der physikalischen Chemie vorantreiben.

Die Deutung und Interpretation der Wellenfunktion erwies sich jedoch von Anfang an als problematisch. Entsprechend dem Messpostulat gibt das Absolutquadrat von $\psi(q)$ zwar die Wahrscheinlichkeit an, bei einer Messung ein Quantenobjekt am Ort q anzutreffen, doch der epistemische und ontologische Status der Wellenfunktion ist damit nicht geklärt. Borns ursprüngliche Idee, den statistischen Charakter auf eine Streuung von Teilchenensembles zurückzuführen, verkennt den nicht-klassischen Charakter des quantentheoretischen Formalismus. Wir können und dürfen hier nicht mehr von getrennten und vollkommen unabhängigen Variablen ausgehen. Die Variablen eines Quantensystems stehen in einer nicht trivialen Beziehung zueinander. Ihre Freiheitsgrade sind gegenüber einem klassischen System um die Hälfte reduziert. Mit Blick auf die mathematische Beschreibung erscheinen die Unschärfen jetzt nicht nur als Messfehler, sondern ergeben sich prinzipiell aus der theoretischen Anlage der Quantentheorie.

Die Kopenhagener Deutung und die hieran anschließende mathematische Ausarbeitung der Quantentheorie durch v. Neumann schließt das Interpretationsproblem durch ein merkwürdiges Postulat ab: Die Messung erzeugt das, was gemessen wird. Vor der Messung existieren Quantenobjekte nicht in klassischer Form (z. B. als Elektronenteilchen, die einer Bahn folgen). Die Messbeobachtung erzeugt einen Schnitt in der Welt. Mit ihr kommt es zum Kollaps der Wellenfunktion und eine klassische Realität erscheint, mit der wahrnehm- und messbare Objekte auftreten. Welcher Preis für diese Deutung zu zahlen ist, wird mit den Gedankenexperimenten von Einstein, Podolsky und Rosen sowie den Überlegungen zu ‚Schrödingers Katze‘ deutlich.

Die Quantentheorie der 1930er-Jahre führt aufgrund ihrer inneren Logik zu Bezugsproblemen, welche die klassischen Anschauungen überschreiten wie zugleich wieder affirmieren lassen. Die klassischen Begriffe werden gebraucht, um der Theorie einen experimentellen und physikalischen Sinn zu geben, der jedoch durch den mathematischen Formalismus der Quantentheorie selbst nicht gedeckt ist. Für die Quantenphysik stellt sich nun die Frage ihrer Interpretation. Deutungsfragen sind jedoch Sinnfragen und diese werden üblicherweise eher den hermeneutischen Geisteswissenschaften oder gar der Theologie zugerechnet. Der Erfolg der Quantentheorie geht somit Hand in Hand mit einer Deutungsproblematik. In der klassischen

Physik beruhen die theorieleitenden Anschauungen auf Bildern, die mit Common-Sense-Konzepten nachvollziehbar sind. Selbst Einsteins Gedankenexperimente (etwa der Forscher, der auf einem Lichtstrahl reitet), sind hiermit noch anschaulich begreifbar. Die Quantentheorie führt demgegenüber in eine Physik, welche die Metaphysik des Common Sense in Frage stellt und darüber hinaus Sinn – zumindest in der Protoform von Information – in die physikalische Grundlagenwissenschaft einschleust.

An dieser Stelle abschließend ein Zitat von Archibald Wheeler und Max Tegmark, in dem beide die Hoffnung ausdrücken, in Zukunft zu einer begriffsfreien Theorie gelangen zu können, einer Theorie, die nicht mehr durch die Problematik des Erklärens und Verstehens geprägt ist und mit der sich somit auch die verstörende Frage des Beobachters tilgen lässt. Auch hier begegnen wir noch Einsteins Vision, zu einer eleganten Physik zurückzukehren, die in einem Formalismus aufgeht, der nicht durch die Unschärfen von Sinn sowie durch paradoxe Anschauungen belastet ist:

»Eine allumfassende Theorie müsste vermutlich gar keine Begriffe enthalten. Andernfalls würde man sehr wahrscheinlich eine Erklärung für ihre Begriffe in Form einer noch fundamentaleren Theorie suchen – und so immer weiter in unendlichem Regress. Mit anderen Worten, die Theorie müsste rein mathematisch sein, ohne erklärende Postulate. Vielmehr sollte ein unendlich intelligenter Mathematiker fähig sein, die gesamte Hierarchie der Theorien allein aus diesen ultimativen Gleichungen herzuleiten, indem er die von ihnen beschriebenen Eigenschaften des Universums herleitet – und die Eigenschaften seiner Bewohner und ihre Wahrnehmungen der Welt.«¹⁰⁴

¹⁰⁴ Tegmark und Wheeler (2001).