

Verstehen in der Quantenphysik

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde

der

Philosophischen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität

zu Bonn

vorgelegt von

Vera Spillner

aus

Heidelberg

Bonn, 2011

Gedruckt mit der Genehmigung der Philosophischen Fakultät der
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.

Zusammensetzung der Prüfungskommission:

Prof. Dr. Hans-Joachim Pieper

.....

(Vorsitzende/Vorsitzender)

Prof. Dr. Andreas Bartels

.....

(Betreuerin/Betreuer und Gutachterin/Gutachter)

Prof. Dr. Elke Brendel

.....

(Gutachterin/Gutachter)

Prof. Dr. Dieter Sturma

.....

(weiteres prüfungsberechtigtes Mitglied)

Tag der mündlichen Prüfung: 4.12.2010.

Inhaltsverzeichnis

1	Rätselhafte Quantenphysik	1
1.1	Einleitung	1
1.2	Debatten um die Interpretation der Theorie	4
1.3	Vier prominente Deutungen	8
1.3.1	Kopenhagener Deutung und Maudlins Interpretation	9
1.3.2	Verborgene Variablen und Viele Welten	10
1.4	Von der Formel zur Deutung	13
1.5	Aufbau der Arbeit	15
2	Erklären	17
2.1	Einleitung	17
2.2	Realisten und Vertreter eines epistemischen Erklärungsbegriffs	19
2.3	Hempels Erklärungs begriff: Das DN-Modell	22
2.4	Bekannte Einwände gegen das DN-Modell	24
2.5	Die Induktiv-Statistische Erklärung IS	27
2.6	Versuch einer Replik: Die ‘Hidden Structure Strategy’	28
2.7	Wesley Salmons Verbesserungsvorschlag: Das SR-Modell	29
3	Kausal-mechanistische Theorien der Erklärung	31
3.1	Theorien der Kausalität	31
3.2	Kausale Prozesse	31
3.3	Salmons kausal-mechanistisches (CM)-Modell	32
3.4	Salmons Übertragung einer Markierung	35
3.5	Bekannte Probleme des CM-Modells	37
3.6	Einwände gegen Salmons Theorie	38
3.7	Die Theorie der Erhaltungsgrößen	40

Inhaltsverzeichnis

3.8	Erhaltungsgrößen statt Markierungen	41
3.9	Einwände gegen die Erhaltungsgrößentheorie der Kausalität	43
3.9.1	Aronsons und Fairs Transfertheorie	45
4	Vereinheitlichende Erklärung	47
4.1	Kitchers Modell	47
4.2	‘Herkunft’ und ‘Entwicklung’	49
4.3	Kritik am vereinheitlichenden Erklärungsmodell	50
4.4	Brücke zwischen ‘Erklären’ und ‘Verstehen’	53
5	Wissenschaftliches Verstehen	59
5.1	Ist Verstehen epistemisch relevant?	59
5.2	Bekannte Modelle wissenschaftlichen Verstehens	63
5.2.1	Kausal-mechanistisches Verstehen	63
5.2.2	Vereinheitlichendes Verstehen	66
5.3	Die Bündeltheorie des Verstehens	69
5.3.1	Bündelkriterien: Visualisierbarkeit und Individuen	74
5.3.2	Stetigkeit und Analogie	78
5.3.3	Lokalität und Symmetrien	80
5.3.4	Lorentzinvarianz, Einfachheit und Mechanismen	83
5.3.5	Stürme und Fahnenmasthöhen verstehen	84
5.3.6	Was verstehen Physiker nicht an der Quantentheorie?	86
5.4	Zusammenfassung	87
6	Grundlegende Begrifflichkeiten der Quantenmechanik	91
6.1	Der Zustand eines Quantensystems	91
6.2	Kompositzustände und Observable	93
6.3	Eigenvektoren und Wellenfunktion	94
6.4	Bewegungsgleichung, Superposition und Messproblem	96
6.5	Hilbertraum und mathematische Unschärferelation	99
6.6	Messproblem (Teil 2) und Schrödingers Katze	100
6.7	Fazit	103
7	Das EPR-Paradoxon	105
7.1	Bedeutung des EPR-Gedankenexperiments	105

7.2	Vorgeschichte: Bohrs Komplementarität	106
7.3	Was ist ein EPR-Experiment?	108
7.4	Formale Darstellung	110
7.5	Kurzzusammenfassung der EPR-Problematik	114
7.6	Folgerungen von Einstein, Podolski und Rosen	115
8	Wesentliche Begriffe im Überblick	119
8.1	Lokalität	119
8.2	Separabilität	122
8.3	Parameter- und Ergebnisunabhängigkeit	123
8.4	Lokaler Realismus und Partikularismus	125
9	Vertiefung der EPR-Problematik	127
9.1	Separabilität und Lokalität im EPR-Experiment	127
9.2	Nichtlokale Realität, Lorentzinvarianz und Feldtheorien	128
9.3	Reaktionen auf Einstein, Podolski und Rosen	132
9.4	Relativistik und widersprüchliche Realitäten	136
9.5	Kollaps im EPR-Experiment	139
9.6	EPR-Korrelationen anders als Newtons Fernwirkung	140
9.7	Ausblick	141
10	Kopenhagener Deutung: Die epistemische Kollapstheorie	143
10.1	Die Ursprünge der Deutung	143
10.2	Korrespondenzprinzip und Komplementarität	145
10.3	Messkontext und klassische Konzepte	147
10.4	Kopenhagener Deutung des EPR-Experiments	150
11	Tim Maudlins kausale Kollapsdeutung des EPR-Experiments	153
11.1	Ein neues Konzept der Kausalität wird benötigt	153
11.2	Ist die EPR-Korrelation kausal?	154
11.3	Kausale Implikationen	158
11.4	Überlichteinflüsse in deterministischen und indeterministischen Deutungen	161
11.5	Überlichteinflüsse nicht eliminierbar	165
11.6	Kollaps als kausale Verbindung	167

Inhaltsverzeichnis

11.7	Überlichtkausalität und Lorentzinvarianz	171
11.8	Maudlins Lösungsansatz, Vorüberlegungen	172
11.9	Das ‘Auto-Garagen’-Beispiel der Relativitätstheorie	176
11.10	Relativistische Demokratie der Hyperebenen	178
11.11	Was wäre, wenn es keinen Kollaps gäbe?	181
11.12	Verwerfen der Wertedefiniertheit: Many Minds	182
11.13	Kritik an der ‘Many-Minds’-Theorie	187
11.14	Zusammenfassung	189
12	Bohms kausale Non-Kollaps-Deutung	191
12.1	Die de Broglie-Bohm-Theorie	191
12.2	Wurden verborgene Parameter nicht widerlegt?	193
12.3	Formalismus der bohmschen Quantenmechanik	196
12.3.1	Zugewinn an Anschauung	199
12.4	Der Messprozess in der bohmschen Deutung	200
12.5	Das EPR-Experiment in der bohmschen Deutung	202
12.6	Vor- und Nachteile der bohmschen Deutung	203
12.6.1	Überlichteinflüsse beim EPR-Experiment	203
12.6.2	Komplexität der Theorie	204
12.6.3	Status der Ortskoordinate	205
12.6.4	Status der Wellenfunktion	207
12.6.5	Spins in der bohmschen Deutung	207
12.6.6	Kontextualität	208
12.6.7	Nichtlokalität und Lorentzinvarianz	209
13	Vergleich der Deutungen	213
13.1	Verstehbarkeit quantenmechanischer Interpretationen	213
13.2	Die Kopenhagener Deutung im Vergleich mit Maudlins Interpretation	215
13.3	Die Kopenhagener Deutung im Vergleich mit Bohms Interpretation	218
13.3.1	Führungsfeld und Ortskoordinate	218
13.3.2	Welle-Teilchen-Dualismus und Stetigkeit	219
13.3.3	Eigenschaften, Lokalität und Wahrscheinlichkeiten	219

13.3.4 Welche Deutung ermöglicht das beste Verstehen? . . .	220
13.4 Maudlins Deutung im Vergleich mit Bohms Interpretation . .	224
13.4.1 Separabilität und Lokalität	224
13.5 Verstehen in Kollaps- und Non-Kollaps-Theorien	225
13.6 Wissenschaftliches Verstehen mit Bohms Theorie	226
14 Kritik an Verborgenen Variablen: Das Kochen-Specker-Theorem	229
14.1 Kontextualität im EPR-Experiment	229
14.1.1 <i>SUM</i> und <i>MULT</i> - zwei Relationen, die zum Wider- spruch führen	232
14.1.2 Beweis	233
14.1.3 Folgerungen für $W(1)$ und $W(P_n)$	234
14.1.4 Der Widerspruch wird herbeigeführt	234
14.2 Folgerung	235
14.2.1 Der Widerspruchsbeweis in Worten	236
14.2.2 Versteckte-Variablen-Theorien sind kontextuell	236
14.3 Drei klassische Prinzipien stehen auf dem Spiel	237
14.4 Lösung <i>A</i> : Aufgabe des Werterealismus	239
14.5 Lösung <i>B</i> : Aufgabe der Wertedefiniertheit	240
14.6 Lösung <i>C</i> : Akzeptanz der Kontextualität	241
14.7 Ergebnis	243
15 Zusammenfassung	245
15.1 Bündelbegriff wissenschaftlichen Verstehens	245
15.2 Eine Deutung reüssiert	248
Literaturverzeichnis	253
Danksagung	260

1 Rätselhafte Quantenphysik

1.1 Einleitung

Ich bin mir dessen bewusst, dass die meisten Menschen, auch gerade jene, für die Probleme höchster Komplexität zugänglich sind, nur selten die einfachste und offensichtlichste Wahrheit akzeptieren können, wenn damit einhergeht, dass sie die Fehlerhaftigkeit jener Folgerungen zugeben müssten, die sie mit Freude anderen Kollegen erklärt, stolz ihren Studenten vermittelt und Faden um Faden in den Stoff ihres Lebens eingewoben haben.

Lew Tolstoj

Die Quantenmechanik stellt heutzutage eine der erfolgreichsten physikalischen Theorien dar. Sie beschreibt eine immense Bandbreite von Naturphänomenen, Ereignisse in der innersten Struktur der Materie: beispielsweise, wie Licht von Materie absorbiert und emittiert wird oder wie sich Festkörper und Flüssigkeiten verhalten, auch gerade bei tiefen Temperaturen, wo sich überraschende Phänomene zeigen. Selbst die Interaktion zwischen zwei oder mehreren Elementarteilchen oder von Elementarteilchen mit komplexeren Objekten, wie Atomen oder Festkörpern, wird durch die Quantenmechanik beschrieben.

Auf allen Gebieten innerhalb dieser großen thematischen Bandbreite macht die Theorie präzise Vorhersagen, die sich experimentell überprüfen lassen und bis heute die Quantenmechanik nur bestätigen. Der Physiker Richard Feynman hat die Exaktheit der Quantenmechanik in Bezug auf ihre experimentell überprüfbareren Vorhersagen damit verglichen, dass man die Breite der Vereinigten Staaten an der Stelle ihrer größten Ausdehnung auf ein Haar genau bestimmen können müsste, um dieselbe Exaktheit zu erreichen.

1 Rätselhafte Quantenphysik

Doch nicht ihre exakten Vorhersagen machen die Quantenmechanik besonders faszinierend, sondern dass sie dabei diejenige Theorie ist, die der klassischen Physik am wenigsten ähnelt. Die Gesetze des Mikrokosmos fordern unsere Vorstellungskraft heraus und führten dazu, dass Richard Feynman in einer vielzitierten Bemerkung feststellte: "I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics."¹ Ein Wortspiel, das zum Nachdenken anregt: Woran liegt es, dass sich die Quantenmechanik unserem Verständnis zu entziehen scheint? Besitzt die Theorie eine intrinsische Struktur, die sich dem menschlichen Verstand prinzipiell widersetzt? Und wenn es so sein sollte, was unterscheidet sie von anderen physikalischen Theorien, die wir besser zu verstehen meinen? In der vorliegenden Arbeit werden diese Fragen verfolgt und drei verschiedene berühmte Interpretationen der Quantenmechanik vorgestellt. Anschließend wird sich in einer Analyse zeigen, warum manche der Interpretationen, die sich alle auf denselben mathematischen Formalismus beziehen, möglicherweise besser geeignet sind als andere, etwas zu erzeugen, was wir 'Verstehen' nennen können. Dazu wird in dieser Arbeit in Kapitel 5 eine neue Definition für den Begriff des 'Wissenschaftlichen Verstehens' vorgeschlagen, aus dem sich ein Maß für das durch eine Interpretation ermöglichte Verstehen ergibt (siehe S. 59).

Dass sich die Quantenmechanik stark von der klassischen Physik unterscheidet, wird schon bei oberflächlicher Betrachtung deutlich. Anders als die klassische Physik versucht sie, eine Welt zu erfassen, die von unserer Alltagserfahrung sehr weit entfernt ist - weit entfernt nicht im Raum, sondern vor allem in der Größe. Jene in der Quantenmechanik behandelten Entitäten - wie einzelne Atome, Elektronen und Neutronen oder auch Photonen, die Teilchen des Lichts - lassen sich nicht mehr mit dem bloßen Auge detektieren. Um sich vorzustellen, wie klein ein Atom ist, kann man einen Aluminiumwürfel mit der Kantenlänge von etwa 1,5 Zentimetern in die Hand nehmen. In diesem Würfel befinden sich 10^{24} Aluminiumatome. Diese Zahl ist unvorstellbar groß, man kann aber Vergleiche finden, über die wir uns der Gewaltigkeit einer solchen Zahl annähern können. So enthält beispielsweise eine einzelne Zelle eines Organismus etwa 10^{12} Atome, eine Billion. Stellt man sich andererseits bei-

¹Feynman, R.: The Character of Physical Law. Modern Library, New York 1965, S. 123.

spielsweise eine große Ladung von Sand in einem Lastwagen vor, so entspricht die Anzahl der Sandkörner auch hier etwa einer Billion. Zehn solcher Lastwagen enthalten dann 10^{13} Sandkörner ($10 \cdot 10^{12} = 10^{13}$). Um also gleich viele Sandkörner wie Aluminiumatome in einem Würfel zu erreichen, bedürfte es so vieler Lastwagenladungen von Sand, wie sich Sandkörner in einem einzigen Lastwagen befinden ... also 10^{12} Lastwagenladungen! Die Anzahl der Aluminiumatome in einem kleinen Würfel entspricht also einer schier unvorstellbaren Menge von Sandkörnern. Um andererseits zu verstehen, in welcher Anzahl Photonen - die Quanten des Lichtes - in bestimmten Situationen vorliegen, kann man eine 20-Watt-Glühbirne betrachten. Eine solche emittiert in einer Sekunde 10^{20} Photonen.

Diese gigantischen Zahlen zeigen, wie extrem klein die Atome im Vergleich zu unserer Alltagserfahrung sind und welche ungeheuren Mengen von Lichtteilchen innerhalb kurzer Zeit emittiert werden können. Quantenphysik ist die Theorie, die diese winzigen Bausteine beschreiben soll. Sie ist dabei aber nicht nur eine Kopie, eine kleinere Ausgabe unserer Alltagswelt, denn dann wäre sie nicht besonders rätselhaft. Tatsächlich tauchen in der Quantentheorie stattdessen grundlegend von unserer Alltagserfahrung verschiedene und sogar der Erfahrung im höchsten Maße widersprechende Phänomene auf.

Während auf der makroskopischen Ebene 200 Jahre lang Newtons Bewegungsgesetze alles beschrieben, was Menschen beobachten konnten - Geschosse und Planeten und letztlich sogar das Verhalten des elektrischen Stroms und von Magneten - wurde es um 1900 klar, dass die klassische Physik das Verhalten des Mikrokosmos nicht erfassen konnte. Tatsächlich hatte Max Planck nämlich entdeckt, dass Strahlung mit einer Frequenz ν nur in Energiepaketen der Größe $E = h\nu$ emittiert und absorbiert werden kann.² Demnach besteht elektromagnetische Strahlung mit einer Frequenz ν aus teilchenartigen Objekten, wobei jedes dieser Energiequanten eine Energie $E = h\nu$ besitzt. Dies stellte die klassische Wissenschaft vor ein Rätsel.

Die Quantenmechanik sollte einerseits die Newtonsche Physik beinhalten, sie aber andererseits auch erweitern, also: ersetzen - und den Mikrokosmos, aber auch den Makrokosmos beschreiben. Die erwünschte Universalität der

²Das so genannte Plancksche Wirkungsquantum h ist eine Proportionalitätskonstante.

1 Rätselfhafte Quantenphysik

Theorie klingt schon im Namen an: Als ‘Quanten’-‘Mechanik’ soll sie einerseits die Mechanik beschreiben, also Kräfte und Bewegungen: wie Dinge sich bewegen, warum sie sich bewegen, wie die Gesetzmäßigkeiten dahinter lauten. Außerdem soll sie auch den unklassischen Charakter der quantisierten Energie und Wirkung erfassen.

Der Universalcharakter der Theorie verursachte jedoch von Anfang an Probleme, unter anderem deswegen, weil eine Theorie des Mikro- und Makrokosmos die in ihr auftretenden Seltsamkeiten auch auf unsere makroskopische Welt übertrug - was zu Interpretationsproblemen führte. Diese Übertragung mikrokosmischer Phänomene in makroskopische Bereiche liegt in der mathematischen Struktur der Quantenmechanik begründet, die keine Variable (keinen ‘cutoff’) beinhaltet, die die Gültigkeit der Theorie auf bestimmte - beispielsweise mikroskopische - Skalen einschränken würde. Zwar werden bestimmte Eigenschaften, wie der Wellencharakter der Teilchen, in makroskopischen Bereichen vernachlässigbar. Während Elektronen bei Durchgang durch den Doppelspalt noch sichtbar mit sich selbst interferieren und jenes charakteristische Beugungsbild erzeugen, können wir die Interferenzeffekte eines Fußballs nur berechnen, nicht aber beobachten, weil sie dort, wo die Wirkung (das Produkt aus Energie und Zeit) wesentlich größer ist als das Plancksche Wirkungsquantum h , schlicht zu klein sind. Sie existieren aber weiterhin. Insbesondere bei quantenmechanischen Unklassizitäten wie dem Phänomen der Superposition oder der Verschränkung führt das Bestehen-Bleiben von Quanteneffekten auf der makroskopischen Ebene zu Effekten, die wir uns nicht befriedigend erklären können.

1.2 Debatten um die Interpretation der Theorie

Wenngleich sich die Vorhersagen der Quantenmechanik experimentell überprüfen lassen, herrscht Unklarheit darüber, wie man das Geschehen, das dem Messwert in einem Experiment vorausgeht, deuten soll. In der Tat müssen Physiker sich dazu auf eine der unterschiedlichen und mehr oder weniger paradox scheinenden Interpretationen der Quantenmechanik festlegen. Dies hat bislang jedoch den Erfolg der Theorie keineswegs zu schmälern vermocht. So

1.2 Debatten um die Interpretation der Theorie

muss beispielsweise jede moderne physikalische Theorie, wie unter anderem auch die Superstringtheorie, eine so genannte Quantentheorie sein; das heißt, dass sie bestimmten mathematischen Relationen genügen muss, die in der Quantenmechanik auftauchen. Während die mathematische Struktur bis heute Physiker nahezu kritiklos überzeugt, bleiben viele der Unklarheiten und scheinbaren Widersprüchlichkeiten in der Interpretation der Quantenmechanik Gegenstand intensiver Debatten in Physik und Philosophie.

Einige der überraschenden und unerwarteten Aussagen der Quantenmechanik betreffen beispielsweise das, was wir den *Zufall* nennen. In der Quantenmechanik ist es möglich, dass zufällige Prozesse sich nicht weiter auflösen und durch deterministische Gesetze erklären lassen. Anders als in der klassischen Mechanik, wo ein Würfelwurf scheinbar zufällig ist, sich aber letztlich durch Beschaffenheit des Würfels und der Tischoberfläche sowie Abwurfhöhe und -geschwindigkeit des Würfels theoretisch errechnen ließe, gehen viele Interpretationen der Quantenmechanik davon aus, dass genau dies im Mikrokosmos prinzipiell unmöglich ist, da dem Zufallsprozess dort keine verborgene deterministische Gesetzmäßigkeit zugrunde liegt. Auch das mit dem Zufall verwandte Konzept der Wahrscheinlichkeit wird in der Quantenphysik in unklassischer Weise verwendet. Die Quantenmechanik erlaubt, dass verschiedene Wahrscheinlichkeiten einander auslöschen können. Wenn beispielsweise ein Teilchen auf zwei Wegen von A nach B gelangen kann (jeder Weg für sich ist möglich), dann kann es in der Quantenmechanik vorkommen, dass beide Wege zusammen die Passage von A nach B für das Teilchen unmöglich machen. Die Wahrscheinlichkeiten können einander auslöschen.

Eine andere unklassische Idee wird sichtbar bei der Beschreibung der Bewegung individueller Teilchen durch den Raum. Hier sieht man, wie sehr sich die Quantenmechanik von der newtonschen Theorie unterscheidet. Teilchen bewegen sich nämlich in den meisten Interpretationen der Quantenmechanik nicht auf Wegen durch die Raumzeit, sondern reisen anscheinend als *Wellen*, die sich verbreiten und an vielen Orten gleichzeitig sein können. Die Tatsache, dass Teilchen keine Trajektorien durchlaufen, führt zu ungewohnten und unklassischen Effekten.

Während man in frühen Physiksemestern an der Universität oft errechnet,

1 Rätselhafte Quantenphysik

dass in jedem unserer Atemzüge im Mittel einige Moleküle des letzten Atemzuges von Julius Cäsar enthalten sind, ist diese Rechnung dann im strengen Sinne unzulässig: denn um ein Molekül als solches ausmachen zu können, müssten wir es von anderen unterscheiden können. Da es selbst keine Markierung mit sich trägt, die es von anderen unterscheidet, könnte man es höchstens noch über die Weltlinie - seinen raumzeitlichen Pfad - mit Caesar verbinden. Da ein Molekül - im quantenmechanischen Verständnis - sich jedoch nicht auf Pfaden bewegt, bleibt auch dieser Weg versperrt und die paradoxe Situation tritt auf, dass wir individuelle Moleküle nicht voneinander unterscheiden können, ja dass in der Tat der Begriff der Individualität verloren zu gehen scheint. Auch die Interaktion von Teilchen führt zu unerwarteten Ereignissen. Wie eben bereits erwähnt, können Objekte identisch miteinander sein, in all ihren Attributen, also beispielsweise denselben Spin besitzen, dieselbe Masse - und dabei, anders als in der klassischen Physik, ihre Individualität verlieren, also tatsächlich prinzipiell nicht mehr unterscheidbar sein. Die Tatsache, dass man dann nicht mehr weiß, welches Teilchen vor oder nach der Interaktion aus welcher Richtung kam oder in welche läuft, führt zu entscheidenden und makroskopisch beobachtbaren Effekten, auch in der Statistik von Messergebnissen.

Eines der seltsamsten Quantenphänomene aber ist die *Verschränkung zweier oder mehrerer Teilchen*. Dies ist ein Phänomen, das Albert Einstein, Boris Podolski und Nathan Rosen³ in den 1930er Jahren studierten. Einstein nannte die bei diesem Phänomen auftretende Verbindung zwischen zwei Teilchen *spukhafte Fernwirkung*. Tatsächlich tritt zwischen verschränkten Teilchen eine seltsame Verbindung in Kraft, selbst wenn die Teilchen sehr weit voneinander entfernt sind. Über beliebige Distanzen hinweg scheinen sie instantan voneinander zu 'wissen' - sie verhalten sich korreliert - ein Phänomen, das der klassischen Lokalität zutiefst widerspricht. Mit all diesen Seltsamkeiten lässt sich schnell veranschaulichen, warum die Quantenmechanik viele und tiefgehende philosophische Debatten anstoßen konnte. Es ist beispielsweise nicht leicht zu beantworten, was die Quantenmechanik bedeutet, oder wie die Welt so sein kann, wie die Quantenmechanik sie uns darstellt. Auch stellt sich die Frage, ob

³Vgl. *Einstein, A., Podolski, B., Rosen, N.*: Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Phys. Rev.* 47 (1935), S. 777-780.

1.2 Debatten um die Interpretation der Theorie

wir diese Welt verstehen können oder ob wir dafür eine über-menschliche Intelligenz benötigen. Immerhin sind wir als menschliche Wesen an ein Größenniveau gewöhnt, in dem wir operieren und in dem unsere Sinne die Welt begreifen und erkennen können. Auf diesem Niveau haben wir mesoskopische - also zwischen dem Mikro- und dem Makrokosmos liegende - Begriffe gefunden, die auf unserem Niveau Sinn machen und unsere Welt strukturieren: wie Zeit, Wege, Individualität oder Kausalität. Es bleibt fraglich, ob wir mit diesen Prinzipien und Begriffen aber überhaupt andere Größenordnungen begreifen können - oder ob wir überhaupt Begriffe und Konzepte finden können für Bereiche außerhalb unserer Erfahrung, um so Verständnis zu erzeugen.

Eine Anekdote, die die Mehrschichtigkeit unserer anthropozentrischen Denkweise in Bezug auf ungewohnte Dimensionen aufdeckt, erzählt, wie Wittgenstein einmal einen Freund gefragt haben soll, warum es für den Menschen natürlicher gewesen wäre anzunehmen, dass die Sonne sich um die Erde bewegt, als dass die Erde sich dreht und die Sonne dadurch über den Himmel zu wandern scheint. Der Freund soll darauf geantwortet haben, dass es doch offensichtlich sei, immerhin sehe es so aus, als ob sich die Sonne um die Erde bewege, woraufhin Wittgenstein gefragt haben soll, wie es denn wohl ausgesehen haben würde, wenn es so ausgesehen hätte, als ob die Erde sich um sich selbst drehe.

Wenn wir meinen, ferne Dimensionen noch nicht zu begreifen, oder wenn wir unsere Theorien für mangelhaft halten, entstehen Diskussionen über die Reichweite unseres Verstehens. In einer berühmten Debatte zwischen Albert Einstein und Niels Bohr⁴ vertrat so beispielsweise Einstein die Position des Skeptikers, der die Quantentheorie für unausgereift und unvollständig hielt, während Bohr sie verteidigte. Diese Debatte führte dazu, dass Physiker begannen, ihre Konzepte und ihr Verständnis der Quantenmechanik zu präzisieren. Wir werden die Frage danach, was wir verstehen können und was - gerade in Bezug auf die Quantenmechanik - überhaupt Verstehen heißen kann, in dieser Arbeit vertiefen.

⁴Held, C.: Die Bohr-Einstein-Debatte. Quantenmechanik und physikalische Wirklichkeit. Mentis-Verlag, Paderborn 1998.

1.3 Vier prominente Deutungen

Seit der Formulierung der Quantenmechanik und bis zum heutigen Tage gibt es konkurrierende Ideen, wie die Theorie zu interpretieren sei. Physiker können sich generell auf den mathematischen Formalismus einigen.

Ginge es in den Naturwissenschaften nur um das Beschreiben von Vorgängen mit dem Ziel der Vorhersage von Ergebnissen von Experimenten, so verstünde man daher die Debatte nicht, die auf dem Gebiet der Quantenmechanik die Gemüter erhitzt: Die Debatte darum nämlich, wie man die Gleichungen zu interpretieren hat, deren Vorhersagen so gut überprüft sind und die die Natur so hervorragend zu beschreiben scheinen. In der Tat scheint es zunächst paradox, dass hier noch eine Debatte stattfinden kann. Ist nicht durch bisher fehlende Falsifikation gar kein Grund zum Streit gegeben? Tatsächlich ist es so, dass sich die verschiedenen Streitparteien geradezu ausnahmslos auf die mathematischen Gleichungen einigen können. Alle akzeptieren und verwenden beispielsweise die zeitabhängige *Schrödingergleichung*,

$$i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\psi(x,t) = \hat{H}\psi(x,t) \quad (1.1)$$

als Bewegungsgleichung einer Funktion $\psi(x,t)$. Genauso können sich alle auf die zeitunabhängige Schrödingergleichung

$$\hat{H}\psi(x) = E\psi(x), \quad (1.2)$$

einigen, bei der die einzelnen Eigenwerte E_n bei Einsetzen eines passenden Hamiltonoperators \hat{H} mit ungeheurer Präzision die Energieniveaus des Wasserstoffatoms vorhersagen können. Niemand streitet über die Form der Gleichung.

Die Debatte markiert jedoch ein Ziel, das sowohl Physiker als auch Philosophen durchaus als im Zuständigkeitsbereich der Naturwissenschaften liegend anerkennen: nämlich den Wunsch, die mathematischen Gleichungen physikalisch zu interpretieren. Ziel dieser Interpretation ist es letzten Endes, ein irgendwie geartetes besseres ‘Verständnis’ der Vorgänge zu erlangen. Beschreibung allein scheint also nicht alles zu sein, was Naturwissenschaften erreichen wollen - sie zielen auf ein Mehr jenseits der Vorhersage von Ergebnissen. Jenes

1.3 Vier prominente Deutungen

Extra beschwört dann auch die Kontroversen herauf. Anders als die Beschreibung nämlich ist die Interpretation oder Deutung einer Gleichung oder einer Theorie nicht immer durch weitere Beobachtung oder Messung falsifizierbar.

Für die begründete Bevorzugung einer Interpretation werden andere Kriterien herangezogen, wie zum Beispiel Vereinheitlichung, Einfachheit, Symmetrien, kausale Beschreibung. Welches dieser Kriterien jedoch stärker ist als ein anderes, ist offen für Diskussionen und gilt oft nur als eine Frage des Geschmacks. Genau an diesem Punkt entstehen jedoch die Debatten der Quantenmechanik: Ist eine Deutung wie die bald ausführlicher diskutierte *Kopenhagener Deutung*, die minimalistisch möglichst keine Annahmen bezüglich der ontologischen Existenz der in den Gleichungen auftauchenden Größen macht, der so genannten Bohmschen Deutung überlegen, die die physikalische Realität eines Führungsfeldes ψ postulieren muss und ein physikalisch reales Potential V ? Zwar benötigt die Bohmsche Theorie solch zusätzliche Annahmen, dafür aber gelingt ihr eine kausale Deutung, die sich möglicherweise kohärenter in jenes Weltbild einfügen lässt, das wir aus der klassischen Physik kennen. Diese Vor- und Nachteile von Theorien zu bewerten, wird die Aufgabe eines Verstehensbegriffes sein.

1.3.1 Kopenhagener Deutung und Maudlins Interpretation

Vier Standpunkte sind in der Debatte besonders berühmt geworden, auf die im Laufe dieser Arbeit genauer eingegangen werden soll: Der erste ist *Bohrs Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik*.⁵ In dieser Interpretation finden sich ausschließlich Aussagen über Wahrscheinlichkeiten. Eindeutige Vorhersagen lassen sich nicht treffen, sondern lediglich mögliche Messergebnisse und deren Verteilungen berechnen. Die Kopenhagener Deutung geht dabei davon aus, dass hinter diesen Wahrscheinlichkeiten keine ‘tiefere’ Theorie verborgen ist. Sie verneint eine Analogie mit der Thermodynamik, bei der die statistische Physik der Thermodynamik zugrunde liegt und letztere im Grenzwert reproduziert. Die Kopenhagener Deutung versteht sich, anders als die Ther-

⁵Siehe hierzu *Bohr, N.: Atomic Theory and the Description of Nature*. Cambridge University Press, Cambridge 1934.

1 Rätselhafte Quantenphysik

modynamik, als irreduzibel, akausal und rein epistemisch. Ihre spezifischeren Annahmen werden in Kapitel 10 auf Seite 143 dargelegt.

Eine ihrer zentralen Annahmen ist, dass Messwerte nicht Auskunft geben über einen Zustand, der unabhängig von unserer Beobachtung existiert, sondern dass die Ergebnisse eines Messvorgangs erst durch den Messvorgang entstehen. Im Augenblick der Messung kollabiert somit die zuvor am Quantenobjekt vorliegende Superposition von Zuständen - die Überlagerung aller Möglichkeiten, so dass sich ein wohldefinierter Messwert ergibt, und nicht vielmehr alle möglichen Messwerte zugleich. Wie dieser Kollaps stattfindet, wird in der Kopenhagener Deutung nicht weiter spezifiziert.

Andere Kollapsdeutungen versuchen, diesen Kollaps mechanistisch-prozessural und kausal zu verstehen. Als Beispiel für eine kausale Kollapsdeutung wird in Kapitel 11 (siehe S. 153) die Interpretation des Philosophen Tim Maudlin behandelt.

1.3.2 Verborgene Variablen und Viele Welten

Zwei weitere Alternativen zur Kopenhagener Deutung sind besonders prominent. Die eine nennt sich *Verborgene-Variablen-Interpretation* der Quantenmechanik. Die zweite ist die so genannte *Viele-Welten-Interpretation*. In Verborgenen-Variablen-Interpretationen werden die Wahrscheinlichkeiten der Quantenmechanik als ein Zeichen des Unwissens über die zugrundeliegenden Prozesse gedeutet. Eine Verborgene-Variablen-Theorie verwendet also jene von der Kopenhagener Deutung abgelehnte Analogie zur Thermodynamik und betrachtet die Vorgänge der Quantenphysik als mechanistische Prozesse, die von verborgenen Variablen kausal beeinflusst werden. Um dennoch die Vorhersagen der Quantenmechanik zu reproduzieren, können diese verborgenen Variablen allerdings nicht im Raum lokalisiert werden, sondern bedürfen, wie später genauer ausgeführt, der Nichtlokalität.

Eine der bekanntesten Varianten einer *Verborgenen-Variablen-Theorie* ist von David Bohm⁶ formuliert worden. Anders als in der Kopenhagener Deu-

⁶Vgl. *Bohm, D.*: A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of 'Hidden' Variables. In: *Physical Review* 85, Nr. 2 (1952), S. 166-179.

1.3 Vier prominente Deutungen

tung, wo wohldefinierte Messwerte und Eigenschaften eines Objektes erst im Messprozess entstehen, liegt bei Bohm zu allen Zeiten ein Punktteilchen vor. Die Ortsvariable ist also wohldefiniert, und die Theorie bedarf keines Kollapsprozesses, weswegen sie oft als Non-Kollaps-Theorie bezeichnet wird. Auf die Details der bohmschen Interpretation wird in dieser Arbeit in Kapitel 12 (siehe S. 191) genauer eingegangen.

Schließlich gibt es noch die *Viele-Welten-Theorie*, in der durch den Messprozess alle möglichen Messergebnisse realisiert werden. Die unterschiedlichen überlagerten Zustände der Superposition werden als in unterschiedlichen, real existierenden Welten realisiert verstanden. Jedem Summanden der Superposition soll dabei genau ein Universum entsprechen, in welchem der entsprechende Zustand realisiert ist. Als Begründer der Viele-Welten-Interpretation gilt Hugh Everett⁷, wobei der Begriff der ‘Vielen Welten’ nicht eigentlich von ihm stammt, sondern von Bryce DeWitt⁸. Gegen diese Deutung der Quantentheorie existieren mehrere gewichtige Einwände, von denen einer an einem Beispiel verdeutlicht werden soll. Betrachten wir ein Quantenobjekt, bei dem zwei mögliche Messwerte, a und b , auftauchen können. Es gelte dabei, dass a zu 80 Prozent auftritt, b daher nur zu 20 Prozent. Im Bild der vielen Welten verwandelt sich bei jedem physikalischen Ereignis, das mit irreversiblen Änderungen der Gesamtwellenfunktion, so genannten *Dekohärenzeffekten*, einhergeht, die Wellenfunktion in eine Überlagerung mehrerer ‘Zweige’ oder ‘Welten’, die nicht miteinander wechselwirken. Eine Messung spaltet das Universum in mehrere neue Universen auf - in unserem Beispiel in zwei: eines, in dem a gemessen wird, und eines, in dem b gemessen wird. Wir als menschliche Beobachter spalten ebenfalls auf, befinden uns also in beiden Zweigen, nehmen dabei aber mit dem Bewusstsein jeweils nur ein Universum wahr: beobachten also entsprechend a oder b . Im Bild der vielen Welten ist jedoch die Wahrscheinlichkeit, dass wir in dem einen oder dem anderen Ast des Universums landen, 50:50, da die einzelnen Universum-Zweige selbst nicht gewichtet sind. Es bleibt folglich die Frage offen, wie in einem solchen Bild die mit 80:20 gewichteten Messwerte

⁷Vgl. Everett, H.: Relative State Formulation of Quantum Mechanics. In: Rev. Mod. Phys. 29 (1957), S. 454-462.

⁸Vgl. DeWitt, B.: The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics. Princeton Series in Physics, Princeton University Press, 1973.

1 Rätselhafte Quantenphysik

entstehen sollen, die wir beobachten.

Diesen Einwand, dass die Viele-Welten-Theorie die Erwartungswerte von Messergebnissen nicht erklären kann, hat beispielsweise auch Hilary Putnam ausgeführt.⁹ Der Physiker Wojciech Zurek¹⁰ hat versucht, diesen Mangel zu beheben, indem er eine Theorie formuliert hat, bei der die Gewichtung der Wahrscheinlichkeiten erst in den einzelnen Zweigen entsteht. Sein Ansatz ist jedoch weitgehend umstritten. Aufgrund dieser Ungeklärtheit in Bezug auf die Erwartungswerte von Messergebnissen wird in der vorliegenden Arbeit die Viele-Welten-Deutung nicht ausführlicher diskutiert.

Es ist möglich, dass jede der vielen Interpretationen der Quantenmechanik in gewisser Weise einen Schritt hin zu einem naturwissenschaftlichen Verständnis der Gleichungen bedeutet. Dennoch könnte es sich zeigen, dass in jeder Interpretation mindestens einer der klassischen Grundpfeiler aufzugeben ist: sei es das Prinzip lokaler Wechselwirkungen, das der Lichtgeschwindigkeit als oberster Grenze der Fortbewegungsgeschwindigkeit oder das Prinzip separater definierbarer Entitäten mit von der Umgebung unabhängigen Eigenschaften.

Diese alternativen Interpretationen in Bezug auf das Verstehen, das sie erzeugen, gegeneinander abzuwiegen, soll in dieser Arbeit erreicht werden. Ein Ziel ist es, dabei einen Einblick in die Natur des ‘wissenschaftlichen Verstehens’ zu erhalten.

⁹Vgl. *Putnam*, H.: A Philosopher Looks at Quantum Mechanics. In: Robert G. Colodny (Hg.): *Beyond the Edge of Certainty: Essays in Contemporary Science and Philosophy*, Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall (1965), S.75-101, Wiederabdruck in *Putnam: Mathematics, Matter and Method*, Cambridge, Mass., Cambridge University Press 1975, S.130-158.

¹⁰Vgl. *Zurek*, W.: Probabilities from entanglement, Borns rule from envariance. *Phys. Rev.* A71 (2005).

1.4 Von der Formel zur Deutung

Um zu einer begründeten Bewertung zu gelangen, inwiefern die Interpretationen der Quantenmechanik als Erklärungen fungieren und Verstehen ermöglichen, ist es sinnvoll, die Schritte von der mathematischen Beschreibung zur physikalischen Interpretation noch einmal deutlicher voneinander abzugrenzen. Dabei sollen die mathematischen Strukturen, die die meisten Quantenphysiker akzeptieren, genauer unterschieden werden von jener Schwelle der Interpretation, an der die eindeutige Falsifizierbarkeit endet und neue Kriterien der Unterscheidung zwischen Interpretationen der Quantentheorie relevant werden. Auf eine Frage, wie etwas funktioniert, erhofft man sich eine Erklärung. Schreibt jemand als Antwort jedoch eine Gleichung an, so ist zu fragen, ob uns dies als Erklärung schon genügen kann. Selbst gegebenenfalls, wir verstünden das mathematische Gleichungssystem in seiner logisch-abstrakten Aussage - verstünden wir auch, was gemeint ist und wie es sich auf unsere Frage bezieht? Beispielsweise kann man eine allgemeine Gleichung der Form

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial T} \psi(x, T) = \hat{H} \psi(x, T) \quad (1.3)$$

aufschreiben. Natürlich hat obige Gleichung Ähnlichkeit mit der zuvor verwendeten Schrödingergleichung. Sie beginnt aber beispielsweise erst dann, eine Bewegungsgleichung zu werden, wenn wir den oben verwendeten Parameter T mit der 'Zeit' identifizieren, ihn als Zeit interpretieren. Die für uns relevante physikalische 'Information' - dass nämlich eine Bewegungsgleichung vorliegt - entsteht erst in diesem *ersten Schritt* des Interpretierens.

Tatsächlich scheint es, als sei eine mathematische Gleichung allein noch nicht verständlich, noch keine Erklärung. Die Gleichungen allein sind, so will man meinen, einfach leere mathematische Symbole und machen noch keine physikalische Theorie aus. In der Zuordnung physikalischer Begriffe liegt aber auch bereits ein erstes Samenkorn der Uneinigkeit vergraben: denn von welcher Zeit sprechen wir? Von einem Hintergrundparameter, einer Hyperebene oder einer allgemeinen Universalzeit? Sollten später all diese verschiedenen Zeitkonzepte zu identischen Vorhersagen führen, wäre dies ein typisches Beispiel für jenen Interpretationsspielraum, wie er auch in der Quantenmechanik auftaucht.

1 Rätselhafte Quantenphysik

Ohne sich jedoch bereits auf einen wohldefinierten Zeitbegriff festzulegen, kann in diesem ersten Interpretationsschritt der Parameter T zuerst einmal ‘Zeit’ genannt werden; als Oberbegriff für einen Begriffsraum, als Sammelbegriff für eine Menge verschiedener in verschiedenen Theorien der Physik bereits auftretender oder unter dem Begriff ‘Zeit’ motivierbarer Konzepte. In diesem allgemeinen Sinne - einen Parameter T ‘Zeit’ zu nennen, ohne weitere Spezifikation - werden die meisten Physiker der ‘Deutung’ oder ‘Interpretation’ der Gleichung zustimmen. Diese oberflächliche Bezeichnung ‘Zeit’, ohne Spezifikation eines speziellen Zeitbegriffs, reicht zunächst aus, um später Experimente durchzuführen und Vorhersagen zu überprüfen. Zu dem ersten Interpretationsschritt gehört dann noch, alle übrigen in der mathematischen Gleichung auftauchenden Größen, so weit möglich, mit physikalischen Begriffen zu belegen. So wird beispielsweise aus $\frac{\partial}{\partial T}$ eine ‘Änderungsrate’, aus ψ eine ‘Wellenfunktion’ und aus \hat{H} ein ‘Hamiltonoperator’. Erst in einem *zweiten* Interpretationsschritt werden verschiedene Wissenschaftler dann versuchen, die verschiedenen individuellen, speziellen Begriffe auf ihre Adäquatheit in Bezug auf Vorhersagen zu überprüfen. Dabei werden sie spezifizieren, ob die Vorhersagen in allen Messkontexten und für beispielsweise alle Zeitbegriffe valide sind oder nicht.

Im ersten Interpretationsschritt bleibt offen, welchen ontologischen Status die Wellenfunktion einnimmt, ob sie beispielsweise ein Feld beschreibt oder ein einzelnes Teilchen oder ob erst ihr Quadrat eine Wahrscheinlichkeitsdichte bedeutet und sie selbst nur theoretisches Konstrukt bleibt (bekannte Deutungen). Die genaue Einbettung der Begriffe, die Auswahl einer speziellen Bedeutung, geschieht dann erst im *zweiten Interpretationsschritt*. Dort wird dann aus der ‘Zeit’ der ‘Zeitparameter’, aus der Wellenfunktion ψ das Führungsfeld ψ oder aus $|\psi|^2$ eine Wahrscheinlichkeitsdichte und aus H die Beschreibung der messbaren Energie oder tatsächlich alles, was es über die Energie des Zustands zu wissen gibt.

So entstehen verschiedene Interpretationen, je nach der begrifflichen Zuordnung, die man verwendet. Wir wollen in dieser Arbeit erst dann von einer Theorie - oder synonym von einer Interpretation - sprechen, wenn sowohl der erste als auch der zweite Interpretationsschritt ausgeführt worden sind. Es

bleibt dabei die interessante Frage bestehen, ab wann wir eine solche Zuordnung von Worten eine ‘Erklärung’ nennen. Im folgenden Kapitel soll daher ein *Überblick über die Definitionen des Begriffes der ‘Erklärung’ folgen*. Es wird sich zeigen, dass die *Begriffe ‘Erklärung’ und ‘Verstehen’ unterschiedliche Bedeutungen besitzen*, wobei der Begriff des Verstehens in der philosophischen Literatur gegenüber dem Begriff des Erklärens bislang deutlich weniger klar definiert ist. Bei der anschließend folgenden Analyse der quantenmechanischen Interpretationen wird eine neue Definition für ‘wissenschaftliches Verstehen’ vorgeschlagen.

1.5 Aufbau der Arbeit

Zu Beginn dieser Arbeit wird eine *Übersicht über verschiedene Theorien wissenschaftlichen Erklärens* präsentiert. Darin werden insbesondere das deduktiv-nomologische Modell von Carl Gustav Hempel (Kapitel 2), das kausale Erklärungsmodell von Wesley Salmon (Kapitel 3) und das vereinheitlichende Modell von Philip Kitcher (Kapitel 4) erläutert und diskutiert.

In Kapitel 5 wird ein *Bündelbegriff wissenschaftlichen Verstehens* vorgeschlagen, der die verschiedenen zuvor analysierten Modelle wissenschaftlichen Erklärens berücksichtigt. Mit Hilfe dieses Verstehensbegriffes werden zuletzt die verschiedenen Interpretationen der Quantenmechanik bezüglich des durch sie ermöglichten Verstehens verglichen.

Da sich diese Arbeit in Bezug auf die Quantenmechanik insbesondere mit dem von Einstein, Podolski und Rosen vorgestellten EPR-Experiment beschäftigt, wird in Kapitel 6 eine *Einführung in die Begrifflichkeit der mathematischen Quantenmechanik* präsentiert. In Kapitel 7 wird dann das *EPR-Experiment* begrifflich und mathematisch vorgestellt. Daraufhin folgt eine *Diskussion wesentlicher Begriffe* (wie Lokalität, Separabilität u.a.) in Kapitel 8, wonach die *EPR-Problematik* in Kapitel 9 noch einmal vertieft analysiert werden kann.

Schließlich werden in dieser Arbeit drei prominente Deutungen der Quantenmechanik vorgestellt. Kapitel 10 diskutiert die *Kopenhagener Deutung*, in

1 Rätselhafte Quantenphysik

Kapitel 11 findet sich eine ausführliche Analyse der *Deutung des amerikanischen Philosophen Tim Maudlin* und in Kapitel 12 die *Bohmsche Theorie der Quantenmechanik*.

In Kapitel 13 erfolgt ein *Vergleich der drei Deutungen in Bezug auf das durch sie ermöglichte Verstehen*. Dabei wird sich eine der Deutungen im Sinne des hier vorgeschlagenen Verstehensbegriffes als am besten verstehbar herausstellen. Diese Deutung wird bezüglich der in ihr auftauchenden unklassischen Problematiken in Kapitel 14 noch einmal *kritisiert*, erweist sich aber auch danach als den anderen Deutungen in Bezug auf wissenschaftliches Verstehen überlegen.

Eine *Zusammenfassung der Ergebnisse und ein Überblick über die Arbeit* finden sich in Kapitel 15.

2 Erklären

2.1 Einleitung

Viele Naturwissenschaftler und Philosophen sind davon überzeugt, dass ein wichtiges Ziel der Naturwissenschaften neben der Beschreibung von natürlichen Prozessen, Regularitäten, in der Natur vorliegenden Gegebenheiten und dem Ansammeln faktischen Wissens auch jenes ist, unser Verständnis von der Natur, die uns umgibt, zu erweitern und zu vertiefen. Dazu muss jedoch zuerst einmal definiert werden, was wir uns unter dem Begriff des ‘wissenschaftlichen Verstehens’ vorzustellen haben. Geht es dabei letztlich nur um eine möglichst exakte Beschreibung der Natur - zum Beispiel mit Hilfe von Gleichungen, so dass Vorhersagen möglich werden?

Tatsächlich scheint es, als wollten Naturwissenschaftler nicht nur nach dem ‘*Was*’ fragen - nach faktischer Beschreibung - sondern beispielsweise auch nach dem ‘*Warum*’, nach einer Herleitung, Begründung, Erklärung. Sollte die Suche nach ‘Erklärungen’ tatsächlich eine Aufgabe oder ein Ziel der Naturwissenschaften sein, so wäre zu fragen, worin jenes ‘Mehr’ besteht, das eine Erklärung gegenüber einer exakten Beschreibung zu besitzen verspricht oder was eine Beschreibung zu einer Erklärung macht. Auch wäre zu fragen, ob zwischen beiden ‘nur’ ein subjektiver Prozess in Individuen liegt oder ob es metaphysische Zusatzannahmen oder logische Unterschiede in der Struktur einer Beschreibung gegenüber einer Erklärung gibt, wodurch eine Beschreibung zu einer Erklärung wird. Im Laufe der Behandlung obiger Fragen wäre es auch interessant zu betrachten, ob es eine einzige, eindeutige Art der ‘Erklärung’ gibt, deren Struktur man analysieren und aufdecken kann. Und selbst wenn sich eine solche logische Unterscheidung im Rahmen des naturwissenschaftlichen Erklärens formulieren ließe, bliebe es zunächst höchst unklar, ob sie sich

2 Erklären

auch auf andere Gebiete übertragen ließe, in denen ein Begriff des Erklärens oder Verstehens definiert werden soll - wie in den Sprach- oder Gesellschaftswissenschaften.

Es zeigt sich, dass außerhalb der naturwissenschaftlichen Erklärungsmodelle oft andere Prinzipien für Erklärungen eine Rolle spielen. In vielen Erklärungsmodellen der Sprachphilosophie beispielsweise steht die Kommunikation zwischen Individuen im Zentrum des Verständnisbegriffs. Auf solche Ansätze werde ich in dieser Arbeit nur am Rande eingehen können - dies soll jedoch nicht als Wertung verstanden werden. Tatsächlich werden sich die Begriffe des 'Erklärens' oder 'Verstehens' in letzter Konsequenz nicht als objektive Begriffe - unabhängig von Prozessen in oder zwischen Individuen - definieren lassen. Pragmatische oder intersubjektive Definitionen besitzen also durchaus Relevanz. Im Zentrum der hier folgenden Zusammenfassung soll zunächst der Erklärungsbegriff in den Naturwissenschaften stehen, der sich um eine Abtrennung von kommunikativen Prozessen zwischen Individuen bemüht und nach einer unabhängigen intrinsischen Struktur sucht, die eine Erklärung gegenüber einer 'bloßen Aussage' oder Beschreibung auszeichnet.

Wie sich hier bereits andeutet, hängen die Begriffe des Erklärens und des Verstehens eng miteinander zusammen. Rein intuitiv scheint die Verbindung zwischen Erklären und Verstehen darin zu liegen, dass man immer dann, wenn ein Problem durch jemanden erklärt wird oder wenn man es sich selbst erklären kann - und dies erfolgreich ist, meint, etwas 'verstanden' zu haben. Andererseits kann man etwas, das man verstanden hat, auch erklären. Umgangssprachlich wird Letzteres sogar als Beweis für ein 'Verständnis' herangezogen. 'Verstehen' und 'Erklären' scheinen sich auf den ersten Blick also nahezu gegenseitig zu bedingen. Diese Arbeit wird beide Begriffe untersuchen, voneinander unterscheiden - und schließlich wieder miteinander verbinden. Eine langjährige geisteswissenschaftliche Debatte versucht, beide Begriffe klarer voneinander zu trennen. Einen wesentlichen Beitrag dazu leistete beispielsweise auch der Philosoph Michael Friedman mit seiner Veröffentlichung 'Explanation and Scientific Understanding'.¹ Für ihn stellte sich darin die Frage: "What is it about scien-

¹ *Friedman, M.: Explanation and Scientific Understanding. The Journal of Philosophy, Vol. 71, No. 1 (1974), S. 5-19.*

2.2 Realisten und Vertreter eines epistemischen Erklärungsbegriffs

tific explanations generally, that gives us understanding of the world - what is it for a phenomenon to be scientifically understandable?"². In einem später folgenden Kapitel soll Friedmans Versuch, Theorien des 'Erklärens' mit einem Begriff des 'Verstehens' zu verbinden, genauer diskutiert werden. In Anschluss daran stellt diese Arbeit eine neue Definition wissenschaftlichen Verstehens vor, die die bekannten Theorien wissenschaftlichen Erklärens berücksichtigt.

Diese Arbeit wird argumentieren, dass eine 'Erklärung' sich über eine abstrakte Struktur definieren lässt (siehe Kapitel 2.2 oder 2.3 bis Kapitel 4), dass aber das 'Verstehen' einen Schritt mehr bedeutet und unter anderem abhängig ist von den Denkstrukturen des Individuums, in dem Verstehen erzeugt werden soll (siehe Kapitel 5). Bevor eine weitere Diskussion jedoch Sinn macht, sollten zunächst die Theorien des 'Erklärens' zu Wort kommen.

2.2 Realisten und Vertreter eines epistemischen Erklärungsbegriffs

Innerhalb der Wissenschaftsphilosophie gibt es seit Jahrzehnten eine intensive Debatte darüber, was man unter dem Begriff des 'Erklärens' zu verstehen habe. Die Lager teilen sich dabei einerseits in Realisten und andererseits in Vertreter eines epistemischen Erklärungsbegriffes (Antirealisten).

Die 'Realisten' nehmen an, dass die Entitäten und Prozesse, die in einer Erklärung auftauchen, auch tatsächlich, ontologisch, existieren. Gemeint ist damit in den Naturwissenschaften eine beobachterunabhängige Existenz der Beobachtungsgrößen. Eine 'Erklärung' wäre somit in erster Näherung eine exakte Beschreibung einer ansonsten beobachterunabhängigen externen Realität. Diese zunächst so einleuchtende Position ist von Anfang an mit Konflikten behaftet gewesen. So ergaben sich gerade zu Beginn des 20. Jahrhunderts Probleme für den wissenschaftlichen Realismus: Die Objekte, mit denen die Physiker zu arbeiten begannen, waren teilweise prinzipiell (oder in dieser Zeit zumindest) nicht beobachtbar. Zugleich aber erwiesen sie sich als extrem nützlich in der Vorhersage beobachtbarer Phänomene.

²Ebd., S. 5.

2 Erklären

An den unbeobachtbaren Entitäten spalteten sich fortan die Geister. Einige gingen davon aus, dass diese Größen trotz fehlender Beobachtung eine realistische Interpretation erlaubten. Die Objekte, die man in der Theorie formulierte, entsprachen dieser Meinung nach Entitäten in einer beobachterunabhängigen externen Realität.

‘Vertreter eines epistemischen Erklärungsbegriffes’ hingegen mussten eine solche Position verwerfen. Einige von ihnen forderten nicht unbedingt die beobachterunabhängige Existenz der von ihnen beschriebenen Objekte oder Prozesse, sondern akzeptieren, dass naturwissenschaftliche Beobachtungsgrößen eine theoretische Konstruktion sein können, die sich als nützliche Brücke zwischen menschlicher Erfahrung und wissenschaftlichem Experiment erweist. Strenge Vertreter eines epistemischen Erklärungsbegriffes bezeichnen physikalische Objekte als bloße gedankliche oder konzeptionelle konstruierte Stütze, als Hilfskonzepte, mit denen wir Menschen unsere Erfahrungen beschreiben können. In ‘The Aim and Structure of Physical Theory’ schreibt der Philosoph Pierre Duhem³, der sich auf eine antirealistische Position festlegt:

A physical theory is not an explanation; it is a system of mathematical propositions whose aim is to represent as simply, as completely, and as exactly as possible a whole group of experimental laws.⁴

Seiner Auffassung nach liefern die Naturwissenschaften also keine ‘Erklärung der Realität’, sondern helfen lediglich dabei, die Erscheinungen unserer Umwelt nach einem uns verständlichen, zugänglichen Muster zu ordnen.

Zu den Verfechtern epistemischer Erklärungen gehört beispielsweise auch Carl Gustav Hempel, mit dessen Theorie⁵ ich mich im folgenden Kapitel 2.3

³Duhem, P., Wiener, P. (edb.): *The Aim and Structure of Physical Theory*. Princeton University Press, Princeton 1954.

⁴Ebd., S. 19.

⁵Vgl. Hempel, C.: *Aspects of Scientific Explanation and Other Essays in the Philosophy of Science*. Free Press, New York 1965.

Hempel, C.: *The Function of General Laws in History*. *Journal of Philosophy* 39 (1942), S. 35-48.

2.2 Realisten und Vertreter eines epistemischen Erklärungsbegriffs

(siehe S. 22) beschäftigen werde. Für Hempel lag eine epistemische Deutung des ‘Verständnisbegriffes’ näher. Jene Frage nach dem ‘Warum’, die von manchen Wissenschaftlern gestellt wird, bedeutete für ihn nicht, dass man eine zugrundeliegende unabhängige Realität erforscht und erkennt; vielmehr ging es in seinen Augen immer darum, Vorhersagbarkeit herzustellen und damit Manipulierbarkeit zu ermöglichen, eine Sicht, die beispielsweise auch Phil Dowe⁶ teilt.

Wesley Salmon hingegen, dessen Sicht in Kapitel 2.7 (s. S. 29) und vor allem auch in Kapitel 3.3 (s. S. 32) diskutiert wird⁷, vertritt die Gegenposition der Realisten, die davon ausgehen, dass nur aufgrund von real und unabhängig existierenden Entitäten und Prozessen unsere menschlichen Erklärungen auch tatsächlich voraussagend wirken können.

Viele Philosophen verstehen unter Konzepten wie ‘Erklärung’, ‘Gesetz’, ‘Ursache’ und ‘Kontrafaktualen’ eine untereinander verbundene Familie von modalen Konzepten, die nicht gegenseitig zur Erläuterung herangezogen werden dürfen, will man Zirkelschlüsse vermeiden. Hempel und andere suchten daher nach Konzepten außerhalb dieser Familie und bevorzugten Begriffe wie beispielsweise Überprüfbarkeit oder Regularität.

Hempel, C. und Oppenheim, P.: Studies in the Logic of Explanation. *Philosophy of Science* 15 (1948), S. 135-175.

⁶*Dowe, P.*: Physical Causation. Cambridge University Press, Cambridge 2000.

⁷*Salmon, W.*: Four Decades of Scientific Explanation. University of Minnesota Press, Minneapolis 1989.

Salmon, W. (ed.): Statistical Explanation. In: Statistical Explanation and Statistical Relevance. University of Pittsburgh Press, Pittsburgh 1971, S. 29-87.

Salmon, W.: Scientific Explanation and the Causal Structure of the World. Princeton University Press, Princeton 1984.

Salmon, W.: Causality Without Counterfactuals. In: *Philosophy of Science* 61 (1994), S. 297-312.

Salmon, W.: Causality and Explanation: A Reply to Two Critiques. *Philosophy of Science* 64 (1997), S. 461-477.

Salmon, W. und Kitcher, P. (eds.): Minnesota Studies in the Philosophy of Science, Vol. 13, Scientific Explanation, University of Minnesota Press, Minneapolis 1989.

2.3 Hempels Erklärungs-begriff: Das DN-Modell

Für Carl Gustav Hempel galt das Konzept der Kausalität, in humescher Tradition, als nützliche Beschreibung von Regularitäten. Diese Idee floss in sein *deduktiv-nomologisches (DN)-Modell der Erklärung*⁸ ein.

Nach dem DN-Modell besteht eine wissenschaftliche Erklärung aus zwei Bestandteilen, nämlich dem ‘Explanandum’ (was zu erklären ist) und dem ‘Explanans’ (einer Menge von Sätzen, die das zu erklärende Phänomen bestimmen sollen). Damit ein Explanans erfolgreich ein Explanandum beschreibt, müssen nach Hempel mehrere Forderungen erfüllt sein. Beispielsweise muss in diesem Modell das Explanandum eine logische Konsequenz des Explanans sein. Ferner müssen die Explanans-Sätze wahr sein. Dies ist die Komponente, die das Erklärungsmodell *deduktiv* macht. Darüber hinaus muss das Explanans mindestens ein ‘Naturgesetz’ beinhalten.⁹ Dieses muss eine wesentliche Prämisse in der Ableitung des Explanandums darstellen, so dass die Ableitung des Explanandums nicht mehr wahr wäre, wenn man diese Prämisse herausnähme. Dies ist die *nomologische* Komponente des hempelschen Erklärungsmodells.

So könne man also beispielsweise, laut Hempel, die Position des Planeten Mars ableiten, indem man die newtonschen Bewegungsgesetze heranzöge, außerdem die Masse der Sonne und des Mars und deren Geschwindigkeiten und Orte berücksichtige. In dieser Herleitung gelten die newtonschen Gesetze als wichtige Prämisse (und als jenes geforderte Naturgesetz), die zusammen mit den Anfangsbedingungen (Massen, Orte, Geschwindigkeiten) das Explanandum herleiten lässt, und dies über eine deduktiv valide Argumentationskette.

Während jedoch der Begriff des ‘deduktiven Arguments’ relativ klar ist, ist der Begriff des ‘Naturgesetzes’ nicht scharf definiert. Hempel versucht, mit Hilfe der Unterscheidung zwischen ‘zufällig wahren Verallgemeinerungen’ und ‘gesetzesartigen Verallgemeinerungen’ eine Grenze zu den Naturgesetzen zu formulieren. Ein ‘wahrer gesetzesartiger Satz’ könne somit als Naturgesetz gelten, so Hempel und Oppenheim. Das heißt aber auch, dass ein Gesetz in erster

⁸Vgl. *Hempel, C.: Aspects of Scientific Explanation and other Essays in The Philosophy of Science.* Free Press, New York 1965.

⁹Vgl. ebd., S. 248.

2.3 Hempels Erklärungs begriff: Das DN-Modell

Linie eine linguistische Entität ist, die man von anderen Sätzen unterscheiden muss. Hempel und Oppenheim tun dies, indem sie fordern, dass Naturgesetze folgende vier Eigenschaften erfüllen:

- Sie sind universell.
- Sie haben eine unlimitierte Bedeutungsreichweite.
- Sie beziehen sich nicht nur auf spezielle ausgewählte Objekte.
- Sie enthalten nur ‘rein quantitative’ Prädikate.

Das Problem, das Hempel und Oppenheimer hier jedoch haben, ist, dass sich zufällige Verallgemeinerungen nicht immer eindeutig von ‘echten’ Gesetzmäßigkeiten trennen lassen. Bei vielen bekannten Gegenbeispielen beziehen Kritiker sich jedoch oft auf spezielle Objekte und verletzen somit die dritte Forderung. Nimmt man beispielsweise an, dass alle Tomaten, die jemals in Herrn Müllers Kühlschrank gelegt werden, grün sind, dann gilt folgende wahre Verallgemeinerung: ‘Alle Tomaten in Herrn Müllers Kühlschrank sind grün.’ Dennoch meinen wir, hier kein Naturgesetz formuliert zu haben. In der Tat wäre diese Aussage auch nach Hempel und Oppenheim kein Naturgesetz, da man sich auf den speziellen Kühlschrank von Herrn Müller bezieht.

Hempels bekanntestes Beispiel besagt, dass die Tatsache, dass alle Mitglieder des Greensbury School Boards von 1964 eine Glatze hätten, nur zufällig wahr sei¹⁰; der Satz hingegen, wonach alle Gase expandieren, wenn sie bei gleichem Druck eine Temperaturerhöhung erfahren, ein Gesetz sei. Nur Letzteres könne als Erklärung für die Expansion beliebiger anderer Gase herhalten, die erste Information kann hingegen nicht als Erklärung gelten, warum eine bestimmte Person des 1964 School Boards in Greensbury eine Glatze habe. Diese Unterscheidung bleibt jedoch trotz aller Intuition vage. Die Grenze zwischen zufälliger Verallgemeinerung und Naturgesetz ist auch mit obigen Forderungen nicht scharf genug gezogen, denn es könnte ja durchaus denkbar sein, dass der Raum, in dem das Greensbury School Board tagt, mit einem Stoff verseucht ist, der zu Haarausfall führt, oder es gesetzlich festgelegt ist, dass nur Männer

¹⁰Vgl. ebd., S. 339.

2 Erklären

ohne Haare im School Board sein dürfen. In diesem Fall wäre die Glatze bei den Mitgliedern vorhersagbar und kein Zufall. Ob man das Naturgesetz bereits ausreichend beschreibt, wenn man fordert, dass dessen Generalisierung ausnahmslos (!) zutrifft, ist folglich durchaus kritisch zu hinterfragen.

Zuletzt sei noch erwähnt, dass Hempel und Oppenheimer in ihrer Analyse kontrafaktische Formulierungen zu umgehen versuchten, die jedoch bei einer Analyse des ‘Naturgesetz’-Begriffes nützlich sein können. Während bei zufälligen Aussagen nämlich keine kontrafaktische Aussage möglich wäre, ist sie es bei Naturgesetzen durchaus. Denn dass die Tomaten grün werden, wenn man sie in Herrn Müllers Kühlschrank legte, trifft wohl nicht zu; hingegen aber schon, dass ein Gas expandiert, wenn man es in einem Container erhitzt.

2.4 Bekannte Einwände gegen das DN-Modell

In Holger Klärners Buch ”Der Schluss auf die beste Erklärung”¹¹ beschreibt der Autor, worin für Hempel der Zusammenhang zwischen Erklärung und Verstehen bestand: Demnach musste für Hempel eine Erklärungstheorie nicht nur Bedingungen angeben, wann etwas als Erklärung eines Phänomens gilt und wann nicht - sie muss auch zeigen, inwiefern Erklärungen zu *Verständnis* führen. Eine ‘Erklärung’ eines Phänomens führt nach Hempel insofern zu einem Verständnis des Phänomens, als sie zeigt, dass das Phänomen vor dem Hintergrund der angeführten Information *zu erwarten war*.

Dazu schreibt Hempel in seinem Aufsatz ”Aspekte wissenschaftlicher Erklärung” im Jahre 1977:

Eine D-N-Erklärung beantwortet die Frage ‘Warum trat das Explanandum-Phänomen auf?’ also durch den Nachweis, dass sich das Phänomen aufgrund gewisser besonderer Umstände, wie sie in [den die speziellen Sachverhalte beschreibenden Sätzen, Anm. d. A.] $A_1, A_2 \dots A_k$ spezifiziert werden, in Übereinstimmung mit den Gesetzen $G_1, G_2 \dots G_r$ einstellte. Durch diesen Nachweis zeigt das

¹¹ Klärner, H.: Der Schluss auf die beste Erklärung. Gruyter, Berlin/New York, 2003.

2.4 Bekannte Einwände gegen das DN-Modell

Argument, dass unter der Voraussetzung der besonderen Umstände und der fraglichen Gesetze das Auftreten des Phänomens *zu erwarten war*; und genau in diesem Sinne ermöglicht die Erklärung es uns, zu *verstehen, warum* das Phänomen eintrat.¹²

Sowohl in der IS- als auch in der DN-Erklärung Hempels geht es also zentral um nomische Erwartungen, gesetzesartige Erwartbarkeit.

In diesem Punkt stimmen jedoch nicht alle Philosophen mit Hempel überein und manche widersetzen sich diesem Ansatz. In dieser Debatte sind einige berühmte Gegenbeispiele veröffentlicht worden. Beispielsweise schreibt Michael Friedman in "Explanation and Scientific Understanding"¹³, dass eine grundlegende Erwartung noch keine Erklärung darstelle. Die Erwartbarkeit sei noch keine Erklärung und erzeuge auch kein Verstehen. Beispielsweise, so Friedman, könne man mit Hilfe eines Thermometers oder Barometers einen nahenden Sturm vorhersagen. Dennoch habe man das Phänomen als solches dadurch noch nicht verstanden. Friedman selbst vertritt die Ansicht, dass eine Erklärung erst vorliegt, wenn man die Anzahl unabhängiger Phänomene reduziere, die man brauche, um eine Situation zu beschreiben.

Ein anderer Einwand stellt sich der generellen Struktur des hempelschen Modells entgegen und fragt: Warum sollte jede Erklärung DN- oder IS-(Induktiv-Statistische¹⁴)-Struktur besitzen? Daneben gibt es eine sehr breite Debatte zu der Frage, ob alle Erklärungen in der Wissenschaft und im Alltagsleben kausal sein müssen. Zwar spricht Hempel nicht davon, dass X ein Y erklärt, wenn X dieses Y verursacht. Dennoch bedeutet die gesetzmäßige Verbindung zwischen Explanans und Explanandum in vielen Fällen genau das: eine kausale Verbindung. Ein in diesem Umfeld häufig diskutiertes Beispiel lautet folgendermaßen: "Der Stoß meines Knies gegen den Tisch verursachte das Umfallen des Tintenfassens."¹⁵ Nach Michael Scriven erklärt obiger Satz das Umfallen des Fasses,

¹²Hempel, C.: Aspekte wissenschaftlicher Erklärung. Walter de Gruyter, Berlin 1977, S. 6.

¹³Friedman, M.: Explanation and Scientific Understanding. The Journal of Philosophy, Vol. 71, No. 1 (1974).

¹⁴S. Kapitel 2.5.

¹⁵Scriven, M.: Truisms as the Grounds for Historical Explanation. In: Gardiner, P. (ed.): Theories of History, The Free Press, New York 1959, S. 456.

2 Erklären

ohne dass explizit ein Gesetz oder eine Verallgemeinerung ausgesprochen worden sein muss. Hempel hingegen wandte auf dieses Beispiel hin ein, dass das Wort ‘verursachte’ in ”Der Stoß meines Knies gegen den Tisch ‘*verursachte*’ das Umfallen des Tintenfassens.” nicht einfach als irreduzibel gelten dürfe. Dieses deute nämlich eine implizite Gesetzmäßigkeit an. Dadurch erst würde der Satz mehr als eine Erzählung - nämlich eine Erklärung. Als Antirealist kam für ihn jedoch eine kausale Erklärung nicht als Erklärungskonzept in Frage, da Kausalität antirealistischen Philosophien a priori suspekt ist.

Ein weiterer interessanter Einwand stammt von Sylvain Bromberger¹⁶, der auf die Symmetrie zwischen Explanans und Explanandum in Hempels Theorie hinweist. Demnach kann das fallende Barometer zusammen mit der Tatsache, dass dieses fällt, wenn sich ein Sturm nähert, als Erklärung für das Auftreten eines Sturms herangezogen werden - und dies, obgleich uns intuitiv nur der umgekehrte Schluss erklärend scheint (dass nämlich nicht das Barometer den Sturm erklärt, sondern der Sturm das fallende Barometer).

Auch gibt es ein weiteres bekanntes Beispiel, bei dem die Prämissen keine erklärende Kraft zu besitzen scheinen:

- Butch nimmt die Anti-Baby-Pille.
- Butch ist ein Mann.
- Kein Mann, der die Anti-Baby-Pille nimmt, wird schwanger.
- Es folgt: Butch ist nicht schwanger geworden.

Offenkundig sind die Prämissen von ihrem Erklärungsstatus her unbedeutend für die zu erklärende Tatsache, obwohl das Modell Hempels Erklärungsmodell folgt.

Akzeptiert man diese Gegenbeispiele, so versagt das hempelsche Erklärungsmodell insofern, als es keine hinreichenden Bedingungen für Erklärungen angeben kann. Demnach wäre gesetzesartige Erwartbarkeit zumindest nicht das einzige Kriterium für den Status einer Erklärung. Möglicherweise aber be-

¹⁶Vgl. Sklar, L. (ed.): *Explanation, Law and Cause*. Garland Publishing Inc., New York / London 2000, S. 147.

deutet das hempelsche Modell eine notwendige Bedingung für Erklärung. Allerdings würde dann eine weitere Eigenschaft benötigt, die die Richtung der Erklärung festlegt (eine Asymmetrie einführt) und die Relevanz der Prämissen sichert.

2.5 Die Induktiv-Statistische Erklärung IS

In Hempels Modell gibt es zwei Sorten von Erklärungen, nämlich die deduktiv-nomologischen Erklärungen (DN) und die induktiv-statistischen (IS). Beide besitzen eine logische Form, beide benötigen Anfangsbedingungen und gesetzesartige Verallgemeinerungen.

Die Idee einer ‘Erklärung’ soll im DN-Fall dadurch eingefangen werden, dass man sie durch Ableitung aus deterministischen Gesetzen erhält. Als Beispiel einer DN-Erklärung wird meist folgender Fall angeführt:

- Die Zellen des Kleinkindes haben drei Kopien vom Chromosom 21.
- Jedes Kleinkind, dessen Zellen drei Kopien des Chromosoms 21 haben, hat das Down Syndrom.
- Es folgt: Das Kleinkind hat das Down-Syndrom.

Wie aber steht es um statistische Gesetze? Können solche Gesetze überhaupt etwas erklären? Und wenn ja: Unter welchen Bedingungen? In seinem Aufsatz von 1965¹⁷ unterscheidet Hempel zwischen so genannten deduktiv-statistischen Erklärungen (DS) und induktiv-statistischen Erklärungen (IS). Er argumentiert, dass es bei Ersteren darum geht, aus einer Menge von Gesetzen, aus denen mindestens eines ein allgemein statistisches Gesetz darstellt, das Explanandum abzuleiten. Die Struktur dieses Modells einer Erklärung ist ansonsten parallel zum DN-Modell.

Im IS-Modell hingegen werden nicht nur allgemeine Gesetze, sondern auch Spezialfälle zur Erklärung herangezogen. Beispielsweise wäre die Heilung eines Menschen nach Einnahme von Penicillin wahrscheinlicher als ohne Einnahme.

¹⁷Vgl. *Hempel, C.:* Aspects of Scientific Explanation and Other Essays in the Philosophy of Science. S. 331-496.

2 Erklären

Streng beweisen oder ableiten hingegen ließe sich dessen Gesundung aber nicht aus der Tatsache, dass er Penicillin eingenommen hat. In IS-Erklärungen ist die Verbindung zwischen Explanandum und Explanans nicht deduktiv, sondern induktiv, so Hempel. Ein Beispiel für eine IS-Erklärung ist:

- Das Gehirn des Mannes hat 5 Minuten lang keinen Sauerstoff bekommen.
- Fast jeder, der 5 Minuten keinen Sauerstoff bekommt, erleidet eine Verletzung im Gehirn.
- Es folgt: Der Mann hat eine Gehirnverletzung erlitten.

Für Hempel war die DN-Erklärung diejenige, die zu bevorzugen war, da deren Vorhersagekraft größer ist. Die Erklärungskraft einer IS-Erklärung bei Hempel wird hingegen nur dann 'stark' sein, wenn das Explanans dem Explanandum eine hohe Wahrscheinlichkeit verleiht.

Ein weiteres Problem der hempelschen Theorie wird hier schnell offenkundig: Das IS-Modell hat keine Erklärungssicherheit - schon bei geringen Zusatzinformationen wird aus der vermeintlichen Erklärung eine irrelevante Aufzählung von Fakten. Im obigen Beispiel des Gehirns unter Sauerstoffmangel könnte diese Zusatzinformation sein, dass der Mann Profitaucher ist und an lange Phasen des Sauerstoffentzugs gewöhnt ist, oder dass er am Fuße eines kalten Sees lag, so dass sein Sauerstoffverbrauch gesenkt war. Selbst wenn die Prämissen stimmen, können sie nicht das Faktum vorhersagen, das vorliegt, und haben somit scheinbar zunächst keine erklärende Bedeutung. Darüber hinaus scheint für Ereignisse mit niedriger Wahrscheinlichkeit in Hempels Modell gar keine Erklärung möglich zu sein.

2.6 Versuch einer Replik: Die 'Hidden Structure Strategy'

Einwände gegen Hempel, wie das Beispiel des vom Knie umgestoßenen Tintenfassens, können unter anderem mit der These entkräftet werden, die Hempel

2.7 Wesley Salmons Verbesserungsvorschlag: Das SR-Modell

dagegen vorbrachte, nämlich dass hier implizit DN/IS-Erklärungen vorliegen - nur eben 'partiell' oder 'unvollständig' formuliert. Philosophen wie Peter Railton¹⁸ haben diese These übernommen und Unterschiede zwischen 'idealem Erklärungstext' und 'unidealen Alltagserklärungen' herausgearbeitet. Ersterer - der ideale Erklärungstext - beinhaltet alle kausalen und nomologischen Zusammenhänge zwischen Explanans und Explanandum. Railton versucht ferner, den bislang ungenauen Begriff der 'partiellen Erklärung' zu spezifizieren. Nach ihm gilt eine Aussage als partielle Erklärung, wenn sie die Ungewissheit über einige Eigenschaften ausräumt. Dieser Vorschlag bringt jedoch viele nicht intuitiv fassbare Konsequenzen mit sich. Beispielsweise gilt dann auch die Formulierung einer Korrelation zwischen A und B als Erklärung: Immerhin macht es eine von drei Aussagen wahrscheinlicher, nämlich dass entweder A B verursacht, oder B A oder dass beide einen gemeinsamen Grund haben. Dadurch wird die Unwissenheit über A und B verringert. Diese Tatsache ist kontraintuitiv, da wir normalerweise eine Korrelation nicht als Erklärung betrachten. Railtons Idee schließt also möglicherweise zu viele Aussagen in das Umfeld einer Erklärung ein, die selbst noch nicht als Erklärung auf uns wirken. Auch bleibt unklar, wie der Status einer zugrundeliegenden Erklärung relativ zu einer partiellen zu sehen ist, falls die partielle Erklärung alles ist, was die Nutzer dieser Erklärung jemals erfahren und was ihnen genügt.

2.7 Wesley Salmons Verbesserungsvorschlag: Das SR-Modell

Beispielen, in denen eine Asymmetrie zwischen Ursache und Wirkung in der Erklärung bestehen bleibt (wie beim Barometer-Sturm-Beispiel oder wie beim Beispiel des die Antibaby-Pille einnehmenden Mannes), scheint es in irgend einer Weise an erklärenden Eigenschaften zu mangeln. Wesley Salmon formulierte deswegen das '*Statistische Relevanz (SR)-Modell*'.

Im SR-Modell gilt, dass, wenn eine Menge A gegeben ist, dann und nur

¹⁸Vgl. Railton, P.: A Deductive-Nomological Model of Probabilistic Explanation. *Philosophy of Science* 45 (1978), S. 206-226.

2 Erklären

dann ein Attribut C als statistisch relevant für Attribut B gilt, wenn die Wahrscheinlichkeit für B (gegeben A und C) ungleich der Wahrscheinlichkeit für B (gegeben A) ist. Statistisch *relevante* Eigenschaften wären nach diesem Modell erklärend, statistisch *irrelevante* Eigenschaften nicht. Im Beispiel des die Antibaby-Pille einnehmenden Mannes würde das heißen, dass die Wahrscheinlichkeit einer Schwangerschaft für einen Mann unter Einnahme der Pille sich nicht gegenüber der Wahrscheinlichkeit verändert, dass er diese nicht nimmt - für eine Frau hingegen ist das anders. Damit ist die Einnahme der Antibaby-Pille für einen Mann statistisch irrelevant für das Vermeiden einer Schwangerschaft - und somit nicht erklärend.

In Salmons Modell ist eine Erklärung somit kein induktives Argument mehr. Es geht nicht mehr darum, dass ein Explanandum aus einer Fülle verschiedener Explanantes folgt, sondern vielmehr folgt aus einer Fülle von Explanantes eine Fülle statistisch relevanter Informationen. Salmon nennt die von Hempel vorgestellte Theorie ein Beispiel für ‘gute Argumente’; Erklärungen selbst aber seien von diesen verschieden. Irrelevantes sei harmlos in Argumenten, aber fatal für Erklärungen.¹⁹ In Salmons Theorie müssen Erklärungen das Explanandum nicht mehr ‘viel’ wahrscheinlicher machen. Auch ein kleiner Beitrag zur Wahrscheinlichkeit gilt hier schon als Erklärung.

Was jedoch können Hempels IS-Modell und Salmons SR-Modell erklären und was nicht? Sowohl Hempel als auch Salmon gingen davon aus, dass eine Theorie, die einem Ergebnis eine Wahrscheinlichkeit zwischen 0 und 1 zuweisen kann, auch einen Erklärwert besitzt, dass also eine solche Theorie das Ergebnis auch erklärt. Anders als Hempel jedoch besteht Salmon nicht darauf, dass nur individuelle Ereignisse mit hoher Wahrscheinlichkeit erklärt werden können.

¹⁹Vgl. *Salmon, W.:* Four Decades of Scientific Explanation, S. 102.

3 Kausal-mechanistische Theorien der Erklärung

3.1 Theorien der Kausalität

Man könnte annehmen, dass die Definitionsprobleme dessen, was eine Erklärung ausmacht, in den Definitionsproblemen des Begriffes der Kausalität begründet seien. Könnte man nur dieses Konzept genau genug fassen, zeige sich auch, welche Beschreibungen wir als verständlich empfänden und welche somit Erklärungen seien im Vergleich zu bloßen formulierten Tatsachen oder Fakten. Nicht alle Erklärungen benötigen jedoch kausale Strukturen.

Der Philosoph Philip Kitcher hat den Vorschlag gemacht, die vereinheitlichende Wirkung einer Theorie, die in Kapitel 4 genauer definiert wird, als Kriterium für eine Erklärung zu verwenden - darauf werde ich noch im Detail eingehen. Wenn ich jedoch im Folgenden den Ansatz Wesley Salmons mit dem Kitchers vergleichen will und mich unter anderem auch die Frage beschäftigen soll, inwiefern welche Interpretation der Quantenmechanik kausal sei oder nicht, sollte ein kurzer Blick auf den Kausalbegriff in der Philosophie geworfen werden. Im Laufe dieses kurzen Überblicks wird sich ein für uns in der Diskussion nützlicher Kausalitätsbegriff herausstellen.

3.2 Kausale Prozesse

Bei der Definition kausaler Prozesse steht insbesondere die Unterscheidung von *Prozessen* und *Pseudoprozessen* im Vordergrund. Diese sollte eine Kausaltheorie klar voneinander unterscheiden und trennen können - denn eine solche Un-

3 Kausal-mechanistische Theorien der Erklärung

terscheidung ist auch gerade in den Naturwissenschaften von zentraler Bedeutung. So gilt die Beschränkung der Lichtgeschwindigkeit als schnellstmögliche Geschwindigkeit in der Relativitätstheorie beispielsweise nur für Prozesse - und nicht für Pseudoprozesse. Ein bekanntes Beispiel ist ein Lichtstrahl, den man aus einer Quelle emittieren und auf eine weit entfernte Leinwand fallen lässt, die wie eine Kugelschale die Quelle umgibt. Dreht man nun die Quelle, so kann sich unter Umständen der Lichtpunkt auf der entfernten Leinwand schneller als das Licht bewegen, dann nämlich, wenn die Leinwand hinreichend weit entfernt ist. Solche Pseudoprozesse verletzen nicht die Spezielle Relativitätstheorie, auch wenn sie sich nicht an die Lichtgeschwindigkeitsschranke halten. Der Grund dafür ist, dass es keine kausalen Prozesse sind - wie beispielsweise auch Hans Reichenbach¹ argumentiert.

Viele Kausaltheorien tun sich jedoch schwer damit, eindeutig zwischen Prozessen und Pseudoprozessen zu unterscheiden. Beispielsweise definierte Bertrand Russell kausale Prozesse darüber, dass sie durch eine 'kausale Linie' verbunden seien - eine temporäre Folge von Ereignissen, die so verbunden sind, dass, wenn man einige von ihnen gegeben hat, etwas über die anderen abgeleitet werden kann, was auch immer woanders geschieht. Dies beschreibt jedoch auch den Lichtpunkt auf der Leinwand - und ist somit nicht ausschließlich ein Kriterium für kausale Prozesse, oder zumindest möglicherweise nicht in einer oben als wünschenswert angedeuteten oder geforderten Weise.

3.3 Salmons kausal-mechanistisches (CM)-Modell

Wesley Salmons kausale Theorie der Erklärung ist heutzutage die vielleicht prominenteste Kausaltheorie.² Dass er seine frühen epistemischen und statistischen Erklärungstheorien später in seiner Karriere verwarf, liegt daran, dass er mit ihrer Hilfe nicht begreifen konnte, wie wissenschaftliche Erklärungen zu wissenschaftlichem Verstehen führen. Seiner Meinung nach ist wissenschaft-

¹Vgl. *Reichenbach, H.*: Der Aufstieg der wissenschaftlichen Philosophie. In: *Kamlah, A.* und *Reichenbach, M.*: Gesammelte Werke in 9 Bänden, Vieweg, Wiesbaden 1977, S. 288.

²Vgl. *Salmon, W.*: *Scientific Explanation and the Causal Structure of the World*. Princeton University Press, Princeton 1984.

3.3 Salmons kausal-mechanistisches (CM)-Modell

liches Verstehen etwas anderes und tatsächlich ‘mehr’ als nur gerechtfertigte Annahmen über die Zukunft.

Auch die vorliegende Arbeit wird in einem folgenden Kapitel dafür argumentieren, dass wissenschaftliches Verstehen nicht unmittelbar aus einer der Theorien des Erklärens folgt. Im Gegensatz zu der in dieser Arbeit erreichten Schlussfolgerung stellte sich für Salmon jedoch schließlich der kausale Prozess als zentral für jede Form des Verständnisses heraus.

Salmon verwirft die humesche Kausalitätsthese der Regularitäten, also jener Ketten zusammengestellter Ereignisse, und versucht, diese Vorstellung durch kontinuierlich ablaufende Kausalprozesse zu ersetzen. In seiner These, dass man erst den Kausalmechanismus eines Prozesses kennen muss, um den Prozess zu verstehen, ist Salmon auch reduktionistisch. So entwickelte er nach 1984 das so genannte Kausal-Mechanistische Modell (CM, Causal Mechanical Model) der Erklärung. Dieses Modell ist dem von Philip Dowe³ vorgebrachten Prozess-Modell der Erklärung verwandt, in dem Dowe formulierte, dass von Verursachung zu sprechen sei ”[wherever] an event raises the chance of another relative to genuine causal processes linking the two, and the effect occurs”.⁴ Für Salmon war mit einem kausal-mechanistischen Modell auch die Hoffnung verbunden, ein gewisses ‘Mehr’ gegenüber den statistischen Theorien einzufangen. Er definierte dafür einen kausalen Prozess als einen physikalischen Prozess, der dadurch ausgezeichnet ist, dass er die Eigenschaft besitzt, eine *Markierung*, eine Marke, ein Zeichen auf raumzeitlich kontinuierliche Weise zu transmittieren. Diese Markierung wiederum ist eine lokale Veränderung des Prozesses - zum Beispiel ein Kratzer auf der Oberfläche eines Baseballs.

Ein *Prozess* ist dann fähig, eine Markierung zu übertragen, wenn die einmal eingeführte Markierung an einem Raumzeitpunkt persistiert, hin zu anderen Raumzeitpunkten, auch wenn keine weitere Interaktion stattfindet. Beispielsweise wird der Baseball seinen Kratzer mitnehmen. Auch ein sich bewegendes Auto ist nach Salmon ein solcher kausaler Prozess, da es eine Markierung - sich selbst - durch einen Prozess von einem Raumzeitpunkt zu einem anderen

³Vgl. Dowe, P.: Causing, Promoting, Preventing, Hindering. In Ledwig, M., Spohn, W., Esfeld, M. (eds): Current Issues in Causation. Mentis-Verlag, Paderborn 2000, S. 69-84.

⁴Ebd., S. 81.

3 Kausal-mechanistische Theorien der Erklärung

überträgt.

Pseudoprozesse sind hingegen solche, die keine Markierung übertragen können. Das bekannteste Beispiel dafür ist der Schatten eines Objektes. Verändern wir den Schatten (beispielsweise durch Hinzufügen einer Lichtquelle, die ihn schmälert), wird diese Änderung nicht persistieren, es sei denn, wir führten die Lichtquelle mit, wo immer der Schatten sich hinbewegte. Die Modifikation wird also nicht durch die Struktur des Schattens selbst transportiert, was für einen kausalen Prozess charakteristisch wäre.

In dieser Theorie ist es nicht relevant, ob tatsächlich eine Marke übertragen wird. Es reicht, dass die kontrafaktische Formulierung zutrifft, dass ‘wäre der Prozess markiert gewesen, hätte er eine Marke getragen, so hätte er diese übertragen’. Diese kontrafaktischen Aussagen waren für Salmon, der sonst kontrafaktische Konditionale lieber mied, unproblematisch, da sie schnell experimentell überprüft werden können.

Laut CM-Modell besteht die Erklärung eines Ereignisses E dann darin, die kausalen Prozesse nachzuvollziehen, inklusive der Interaktionen (also jener raumzeitlichen Verzweigungen oder Kreuzungen, an denen zwei kausale Prozesse sich treffen und beide ihre Struktur ändern), die zu E hinführen oder zumindest einen Teil dieser Prozesse zu betrachten, diese zu beschreiben und die Interaktionen zu beschreiben, die das Ereignis konstituieren. Eine Erklärung zeigt also, wie ein Ereignis E in das kausale Netz hineinpasst.

In seinem Aufsatz über ”Scientific Explanation” in der Stanford Encyclopedia of Philosophy gibt James Woodward⁵ ein anschauliches Beispiel für einen solchen Salmonschen kausalen Prozess, der somit erklärungsrelevant ist: Man nehme an, ein Ball, der von einem Billard-Stock in Bewegung versetzt wird, trifft auf einen zweiten liegenden Ball, der dadurch ebenfalls in Bewegung versetzt wird. Der erste Ball verändert dabei seine Richtung. Der Billardstock hatte am ersten Ball blaue Kreide hinterlassen, die dieser beim Aufprall auf den zweiten Ball teilweise an diesen weitergegeben hat. Der Billardstock, der erste und der zweite Ball sind kausale Prozesse, wie man durch Übertragung der Kreidemarkierung sieht, und die Kollision zwischen Billardstock und ers-

⁵ Woodward, J.: Scientific Explanation. <http://plato.stanford.edu/entries/scientific-explanation/>, erstmals veröffentlicht Fr., 9. Mai 2003; Revision Fr., 16. Jan. 2009.

3.4 Salmons Übertragung einer Markierung

tem Ball, beziehungsweise erstem und zweitem Ball sind kausale Interaktionen. Salmons Idee sei nun, diese Fakten aufzuzählen, also die vorliegenden Prozesse und Interaktionen zu benennen - und somit eine Erklärung für die Bewegung der Bälle nach der Kollision zu erhalten. Der Schatten jedoch, den einer der Bälle möglicherweise an die Wand wirft, ist kausal und erklärungsstechnisch irrelevant, da dieser nach Salmon nur ein Pseudoprozess ist.

3.4 Salmons Übertragung einer Markierung

In seinem Buch "Scientific Explanation and the Causal Structure of the World"⁶ geht Salmon davon aus, dass Kausalität eine objektive, ontologische Existenz besitzt - dass also nicht nur wir Menschen, in unserem Versuch, die Welt zu ordnen, dieses Konzept als nützlich empfinden, sondern diesem auch ein Gegenstück in der von uns unabhängigen Welt entspricht. Für Salmon ist Kausalität nicht eine Relation zwischen Ereignissen, sondern eine Eigenschaft kontinuierlicher Prozesse. Ein Prozess wiederum ist für ihn definiert als all jenes, was in seiner Struktur über die Zeit hinweg konstant bleibt.⁷

Um wiederum kausale von Pseudoprocessen zu unterscheiden, verwendet Salmon jenes oben bereits geschilderte 'Markierungskriterium', das ursprünglich von Hans Reichenbach stammt⁸ und wonach ein *Prozess* dann *kausal* ist, wenn er eine lokale Modifikation in einer Struktur übertragen kann, eine Markierung. Das Prinzip der Markierungsübertragung wird dabei von Salmon folgendermaßen spezifiziert:

⁶Salmon, W.: Scientific Explanation and the Causal Structure of the World.

⁷Vgl. Salmon, W.: Scientific Explanation and the Causal Structure of the World, S. 144.

⁸Vgl. Reichenbach, H.: Philosophie der Raum-Zeit-Lehre, Walter de Gruyter, Berlin 1928, S. 162ff. Engl. Übers.: The philosophy of space and time. Dover Publications, New York 1958.

3 Kausal-mechanistische Theorien der Erklärung

Let P be a process that, in the absence of interactions with other processes would remain uniform with respect to a characteristic Q , which it would manifest consistently over an interval that includes both of the space-time points A and B ($A - B$). Then, a mark (consisting of a modification of Q into Q^*), which has been introduced into process P by means of a single local interaction at a point A , is transmitted to point B if [and only if , Anmerkung der Autorin] P manifests the modification Q^* at B and at all stages of the process between A and B without additional interactions.⁹

P ist also dann - und nur dann - ein *Prozess*, wenn er ohne weitere Einwirkungen (Wechselwirkungen) eine Eigenschaft über ein Raumzeitintervall hinweg unverändert besitzt. Eine Markierung wiederum ist in dieser Definition eine Veränderung jener Eigenschaft, die dem Prozess aufgrund einer einzigen lokalen Interaktion zu Beginn des Intervalls zugefügt und bis zum Ende des Intervalls kontinuierlich beibehalten wird. Ferner spreche man von Übertragung einer Markierung eben dann und nur dann, wenn jene Markierung an allen Raumzeitpunkten des Intervalls beibehalten würde. Tatsächlich hat nicht Salmon, sondern Elliott Sober auf die ‘dann und nur dann’-Formulierung hingewiesen, die Sober für essentiell hält, um Pseudoprozesse von der Definition auszuschließen (insofern, als diese dann keine Markierung übertragen). Somit sind es für Salmon also kontinuierliche raumzeitliche Prozesse, die kausale Wirkungen übertragen.

Eine kausale *Interaktion* stellt sich dann für Salmon folgendermaßen dar:

Let P_1 and P_2 be two processes that intersect with one another at the space-time point S , which belongs to the histories of both. Let Q be a characteristic of that process P_1 would exhibit throughout an interval (which includes subintervals on both sides of S in the history of P_1) if the intersection with P_2 did not occur; let R be a characteristic that process P_2 would exhibit throughout an interval

⁹Salmon, W.: Scientific Explanation and the Causal Structure of the World, S. 148.

3.5 Bekannte Probleme des CM-Modells

(which includes subintervals on both sides of S in the history of P2) if the intersection with P1 did not occur. Then, the intersection of P1 and P2 at S constitutes a causal interaction if (1) P1 exhibits the characteristic Q before S, but it exhibits a modified characteristic Q* throughout an interval immediately following S; and (2) P2 exhibits R before S but it exhibits a modified characteristic R' throughout an interval immediately following S.¹⁰

Eine *kausale* Interaktion liegt nach dieser Definition also dann vor, wenn sich zwei Prozesse in einem Punkt schneiden und ansonsten unveränderliche Eigenschaften nach dem Schnittpunkt S jedoch verändert vorliegen.

3.5 Bekannte Probleme des CM-Modells

1995 hat Christopher Hitchcock¹¹ eine interessante Kritik an Salmons Modell vorgebracht. Im CM-Modell tauchten als Beispiele vor allem solche Fälle auf, in denen die Wirkung per unmittelbarem Kontakt übertragen wird, wo also kein raumzeitlicher Abstand zwischen den kausalen Agenten liegt. Dabei gäbe es aber keine Erklärung dafür, welche der übertragenen Größen man als kausalen Agenten betrachten könne.

Hitchcock greift dafür auf das Beispiel der Billardbälle zurück, bei deren Stoß auch die blaue Kreide des Billardstockes von der ersten zur zweiten Kugel übertragen wird. Warum, so fragt Hitchcock, soll man ausgerechnet den Impulsübertrag (durch den Stoß) als relevante Erklärung für das Verhalten der Kugeln nach der Kollision mit einer anderen Kugel betrachten - und nicht beispielsweise allein die blaue Kreide für die Bewegung der Bälle verantwortlich machen? Schließlich werde diese genau wie der Impuls übertragen. Es existiere in Salmons Theorie aber kein Unterscheidungskriterium zwischen relevanten und irrelevanten Erklärungen.

¹⁰Salmon, W.: Scientific Explanation and the Causal Structure of the World, S. 171.

¹¹Vgl. Hitchcock, C.: Discussion: Salmon on Explanatory Relevance. Philosophy of Science 62 (1995), S.304-320.

3 Kausal-mechanistische Theorien der Erklärung

Das zugrundeliegende Problem findet sich darin, dass eine spezielle Markierung M, die von einem Prozess P übertragen wird, nicht der kausale Grund für ein Ereignis E sein muss, sondern durchaus eine weitere Eigenschaft R des Prozesses P für E verantwortlich sein kann. Übertragung von Markierungen kann also ein Kriterium sein, das zwischen Prozessen und Pseudoprozessen unterscheidet - diese Unterscheidung trennt aber nicht relevante von irrelevanten Erklärungen.

Ein weiteres Problem, das im CM-Modell auftritt, betrifft Systeme, die von den oben beschriebenen Billardbällen abweichen und beispielsweise, wie die Newtonsche Gravitationstheorie, Wirkung aus der Distanz verwenden, oder andere Prinzipien, die im Billardfall nicht auftreten. Ist die Newtonsche Gravitationstheorie also nicht 'erklärend'? Oder inwiefern erfüllt sie doch das Salmonsche CM-Modell? Die Antworten in der derzeitigen philosophischen Literatur sind vielfältig und die Debatte ist noch nicht abgeschlossen.

3.6 Einwände gegen Salmons Theorie

Philosophen wie Dowe oder Kitcher haben eingewendet, dass Salmons Markierungstheorie weder alle kausalen Prozesse erfasst noch hinreichend gut Prozesse von Pseudoprozessen abgrenzt. Kitcher¹² hat beispielsweise vorgebracht, dass Elementarteilchen so kurzlebig sind, dass man möglicherweise nicht davon sprechen kann, dass sie Eigenschaften über eine Zeit hinweg besitzen. Dies wäre in Salmons Theorie jedoch notwendig, um etwas überhaupt als Prozess, oder als kausalen Prozess, bezeichnen zu können. Somit erfasse Salmons Ansatz nicht alle kausalen Prozesse (wobei die Elementarteilchenprozesse nach Kitcher also ein Beispiel für kausale, kurzlebige Prozesse darstellen). Es sei nicht klar, wie lange etwas eine Eigenschaft besitzen müsse, um als Prozess zu gelten, so Kitcher.

Ein weiterer Einwand Kitchers betrifft die Idealisierung Salmons, dass Prozesse in Abwesenheit weiterer Interaktionen ihre Eigenschaften konstant bei-

¹²Vgl. *Kitcher, P.*: Explanatory Unification and the Causal Structure of the World. In: *Kitcher, P. und Salmon, W.* (ed.): *Minnesota Studies in the Philosophy of Science*, Volume XIII, University of Minnesota Press, Minneapolis 1989, S. 410-505.

3.6 Einwände gegen Salmons Theorie

behalten sollen. Nach Kitcher ist jedes Objekt im Universum ständig in Wechselwirkungen verstrickt, so dass man kaum davon sprechen kann, wie es sich in Abwesenheit solcher verhalten würde¹³. Selbst ein einzelnes Teilchen im Universum interagiere demnach stets mit Raumzeitpunkten. Möglicherweise ist Salmon davon ausgegangen, dass die Interaktion mit der Raumzeit keine kausale Interaktion ist, oder eine, die so universell ist, dass wir sie als für alle Prozesse und Pseudoprozesse als gegeben voraussetzen. Hierzu ist die Debatte jedoch bislang nicht fortgesetzt worden.

Ferner gibt es nach Kitcher kausale Prozesse, die sich ohne bereits stattfindende kausale Interaktionen gar nicht durch die Raumzeit fortbewegen könnten. Somit müsse man genauer darüber nachdenken, wie man Prozesse definiert. Kitchers Beispiel für einen solchen Prozess ist ein Elektron, das nicht propagiert ohne das kausal auf es einwirkende elektrische Feld. Gerade letzterer Einwand kann jedoch sicher kritisch gesehen werden. Gewisse Prozesse können durchaus räumlich ruhen - und propagieren dennoch stets in der Zeit. Somit kann jeder Prozess zunächst definiert werden, ohne auf kausale Interaktionen zurückgreifen zu müssen. Natürlich propagiert auch das ruhende Elektron durch die Zeit und somit durch die Raumzeit, was den Einwand Kitchers entkräftet und Salmons Definition eines Prozesses ohne Zirkelschluss (Verwendung anderer kausaler Prozesse, um den Prozess zu definieren) ermöglicht. Diese kausalen Prozesse können scheinbar alle darüber definiert werden, dass sie uniform bleiben, so lange es keine Wechselwirkung gibt. Damit wäre Salmons Definition nicht per se unmöglich.

Ein dritter Einwand Kitchers ist, dass bestimmte Pseudoprozesse auch Markierungen übertragen können - wie beispielsweise der wandernde Lichtpunkt. Wird vor diesen, vor der Leinwand, ein Filter gehalten, der mit dem Lichtpunkt mitbewegt wird, so scheint der Lichtpunkt eine Markierung von einem Punkt zu einem anderen zu übertragen - obwohl er das als Pseudoprozess eigentlich nicht können soll. Aufgrund der Vagheit der Bezeichnung einer 'Eigenschaft' sei ein Pseudoprozess nicht klar von einem Prozess unterscheidbar, so Kitcher. Man müsse genauer spezifizieren, was als Eigenschaft gelten darf und was nicht. Die lokale Wechselwirkung, die die Markierung übertragen soll,

¹³Vgl. *Kitcher, P.: Explanatory Unification and the Causal Structure of the World*, S. 464.

3 Kausal-mechanistische Theorien der Erklärung

reiche dafür nicht aus. Beispielsweise besitze die höchste Spitze des Schattens des Opernhauses von Sydney, so Kitchers Beispiel, die Eigenschaft, morgens näher an der Harbour Bridge zu sein als am Opernhaus. Zu einem späteren Zeitpunkt t jedoch ändert sich diese Eigenschaft. Eine lokale Wechselwirkung findet statt, denn der Schatten bewegt sich und wandert zur Zeit t am Mittelpunkt zwischen Opernhaus und Brücke vorüber (Wechselwirkungspunkt). Die Markierung, die der Schatten nach t besitzt, nämlich näher am Opernhaus zu sein, wird durch den Prozess übermittelt. Somit wäre der Schatten ein kausaler Prozess.

Doch selbst wenn man die wenig definierten ‘Eigenschaften’ mit den philosophisch präziser definierten ‘properties’ identifizierte, bleiben Probleme bestehen. Pseudoprozesse können beispielsweise eine Änderung einer Eigenschaft erfahren aufgrund eines kausalen Prozesses, von dem sie abhängen: Der Schatten eines Autos beispielsweise erhält eine Markierung, falls ein Mitfahrer eine Fahne aus dem Fenster hält. Man kann darauf sicherlich versuchen einzuwenden, dass der Entstehung einer Veränderung im Schatten des Autos ja eine Kausalkette vorangehe - die Debatte ist an dieser Stelle bislang noch nicht zufriedenstellend abgeschlossen und wird fortgesetzt.

3.7 Die Theorie der Erhaltungsgrößen

In seinem 1980 erschienenen Buch ”Causal Necessity”¹⁴ formuliert Brian Skyrms die Idee, die *Übertragung von Erhaltungsgrößen* zur Grundlage kausaler Prozesse zu machen. 1995 entwickelte Phil Dowe die Theorie weiter¹⁵ und definierte:

Erhaltungsgrößen, Gesetz 1:

Eine kausale Wechselwirkung ist ein Schnitt von Weltlinien, bei dem eine Erhaltungsgröße ausgetauscht wird.

¹⁴Skyrms, B.: Causal Necessity. Yale University Press, New Haven 1980.

¹⁵Dowe, P.: Causality and Conserved Quantities: A Reply to Salmon. Philosophy of Science 62 (1995), S. 321-333.

3.8 Erhaltungsgrößen statt Markierungen

Erhaltungsgrößen, Gesetz 2:

Ein kausaler Prozess ist eine Weltlinie eines Objektes, das eine Erhaltungsgröße besitzt.

Salmon modifiziert diese Gesetze ein wenig, indem er 1997 schreibt, dass bei einem kausalen Prozess eine nicht verschwindende Menge einer Erhaltungsgröße zu jedem Augenblick übertragen wird. Unter ‘übertragen’ versteht er dabei, dass ein Prozess zwischen A und B dann eine Erhaltungsgröße überträgt, wenn er diese Größe an A und B und zu jedem Punkt dazwischen ohne weitere Wechselwirkungen mit anderen Erhaltungsgrößen besitzt.

In beiden Darstellungen wird also die physikalische *Weltlinie*, ein raumzeitlicher, vierdimensionaler kontinuierlicher Pfad, zu einem *Prozess*. Dieser Pfad, den man beispielsweise im Minkowski-Diagramm darstellen kann, markiert die Geschichte eines Objekts. Unter einem *Objekt* wird in der Literatur dabei meist jedes mögliche Ding verstanden, das in der Ontologie der Naturwissenschaften existieren kann (wie beispielsweise Teilchen, Wellen, Felder...), oder makroskopische Objekte (Stühle, Tische...), oder auch Lichtflecken und Schatten. Prozesse sind dann über die *zeitliche Ausdehnung eines Objektes* definiert.¹⁶ Ein Schatten ist nun wiederum zwar ein Objekt, besitzt in sich aber keine Erhaltungsgröße, ist also in seiner zeitlichen Entwicklung kein kausaler Prozess. Er hat Eigenschaften wie Form und Farbe, nicht aber Energie oder Impuls oder ähnliches. Unter Erhaltungsgrößen werden jedoch nur in der Physik als eben so definierte Größen gezählt, wie beispielsweise eben genannte Energie, Impuls, oder Drehimpuls, Spin u. a. ...

3.8 Erhaltungsgrößen statt Markierungen

In den letzten Jahren hat Salmon daraufhin seine Definition der ‘Erklärung’, beziehungsweise kausaler Prozesse, zugespitzt und ebenfalls die Übertragung von Erhaltungsgrößen verwendet. Ein Prozess ist also dann kausal, wenn in jedem Augenblick seiner Vergangenheit ein nicht verschwindender Beitrag ei-

¹⁶Ein *Schnittpunkt* ist dann natürlicherweise der Schnitt zweier oder mehrerer Prozesse.

3 Kausal-mechanistische Theorien der Erklärung

ner Erhaltungsgröße transferiert wird. Eine kausale Wechselwirkung beinhaltet den Austausch bzw. Übertrag einer solchen Erhaltungsgröße. Doch auch in Salmons neuer Theorie bleibt das Problem der Nichtunterscheidung zwischen erklärungs-technisch relevanten und irrelevanten Prozessen bestehen und Hitchcocks Fragen unbeantwortet: Ist die Ladung, das Drehmoment oder der Impuls des Billardballs letztlich verantwortlich für die Bewegung der Bälle nach der Kollision? Welche der Erhaltungsgrößen ist relevant für die Erklärung?

1997 gibt Salmon zu, dass ein kausaler Prozess alleine noch nicht die erklärungs-technische Relevanz beinhaltet oder induziert.¹⁷ Zusammen mit statistischen Relevanzrelationen sei eine erklärungs-technische Relevanz jedoch eindeutig feststellbar:

I would now say that (1) statistical relevance relations, in the absence of information about connecting causal processes, lack explanatory import and that (2) connecting causal processes, in the absence of statistical relevance relations, also lack explanatory import.¹⁸

Wie man allerdings die erklärende Relevanz beispielsweise des Drehmoments des Balles für die Bewegung der Billardkugeln gegenüber dem übertragenen Impuls einer Kugel auf die andere quantifizieren soll, ist nicht klar. Ob Salmons Überlegungen also von praktischem Nutzen sind, um im konkreten Fall zu erklären, welche Erhaltungsgröße für die kausale Erklärung des Prozesses relevant war, bleibt umstritten.

¹⁷ *Salmon, W.:* Causality and Explanation: A Reply to Two Critiques. *Philosophy of Science*, 64 (1997), S. 461-477.

¹⁸ *Salmon, W.:* Causality and Explanation: A Reply to Two Critiques, S. 476.

3.9 Einwände gegen die Erhaltungsgrößentheorie der Kausalität

Spricht man über Erhaltungsgrößen, so spricht man meist auch über geschlossene Systeme - in denen beispielsweise Energie etc. erhalten ist. Die exakte Definition eines geschlossenen Systems erweist sich jedoch als durchaus problematisch. Auch das Problem, Pseudoprozesse klar von kausalen Prozessen abzugrenzen, erweist sich als hartnäckig. Beispielsweise verlangt Salmon, dass bei einem kausalen Prozess eine feste Menge einer Erhaltungsgröße übertragen wird, und zwar gerade in Abwesenheit von Interaktionen, um 'zufällige' prozessartige Erscheinungen auszuschließen. Dowe sieht die Richtung, die diesem Konzept zugrunde liegt, als problematisch und fokussiert lieber auf die Identität eines Objektes in der Zeit.

Doch wie beispielsweise muss man mit dem 1995 von Hitchcock vorgestellten Beispiel umgehen, bei dem ein Schatten über eine elektrisch geladene Platte wandert? Zu jedem Augenblick seines Weges besitzt der Schatten eine feste Ladung. Dennoch ist ein Schatten ein Pseudoprozess. Dowe und Salmon haben darauf erwidert, dass die Platte die Ladung besitzt und nicht der Schatten, dieser sich aber bewege. Es bleibt jedoch schwierig die Plattensegmente, die sich jeweils im Schatten befinden, zu bewerten. Dowe nennt solche Objekte 'zeitartige Gerrymander'.¹⁹ Salmon meint hierzu, dass dieses Objekt keine Ladung transmittiere, da die Ladung sonst in der Platte an jenen Stellen zunehmen solle, an denen sich gerade der Schatten befinde. Denn wenn zwei Prozesse, die eine Erhaltungsgröße tragen, sich schneiden, muss die Menge der Erhaltungsgröße im Schnittpunkt der Summe der einzelnen Erhaltungsgrößen entsprechen, so sein Argument von 1997. Dowe fügt dem hinzu, dass die Weltlinie des sich bewegenden Schatten keine Ladung trage, und ferner die Segmente der im Schatten liegenden Platte zusammen kein Objekt ergäben also auch keine Weltlinie eines Objektes besäßen.

Ein Einwand von Sungho Choi erweist sich jedoch als abermals problema-

¹⁹Dowe, Phil: Causality and Conserved Quantities: A Reply to Salmon. *Philosophy of Science*, Vol. 62, No. 2 (1995), S. 321-333.

3 Kausal-mechanistische Theorien der Erklärung

tisch:²⁰

Man nehme an, man ließe einen Schatten über eine Potentialdifferenz laufen, also beispielsweise über eine Platte, die auf einer Seite stark und auf der anderen wenig geladen ist. Dann nimmt in jedem Schattensegment die Ladung zu, mit der Bewegung des Schattens finden wir also eine Änderung in der Erhaltungsgröße wodurch die Bewegung einem kausalen Prozess entspricht.²¹

Weder Dowe noch Salmon haben bislang auf diesen Einwand geantwortet und er bleibt somit vorerst als berechtigte Kritik an Salmons Definition kausaler Prozesse bestehen.

Wenn das Konzept der Erklärung auf kausalen Prozessen beruht, diese sich aber nur schwer eindeutig identifizieren lassen, dann erweisen sich für die vorliegende Arbeit die obigen Einwände gegen Salmons und Doves Definition kausaler Prozesse als besonders relevant. Doch selbst wenn kausale Prozesse eindeutig definierbar wären, bliebe die Frage bestehen, inwiefern ein solcher Prozesses tatsächlich relevant ist für eine Erklärung. So merkt James Woodward an:

We still face the problem that the feature that makes a process causal (transmission of some conserved quantity or other) tells us nothing about which features of the process are causally or explanatorily relevant to the outcome we want to explain.²²

Eine ähnliche Kritik wird im Zusammenhang mit den im folgenden Kapitel 4 diskutierten vereinheitlichenden Theorien des Erklärens aufkommen. Diese

²⁰ *Choi, S.*: Causation and gerrymandered world lines: A critique of Salmon. *Philosophy of Science*, 69 (2002), S. 105-117.

²¹ *Choi, S.*: Causation and gerrymandered world lines: A critique of Salmon, S. 114, übersetzt durch die Autorin.

²² *Woodward, J.*: *Making Things Happen: A Theory of Causal Explanation*. Oxford University Press, Oxford 2003, S. 357.

3.9 Einwände gegen die Erhaltungsgrößentheorie der Kausalität

Arbeit gibt in Kapitel 5 eine neue Definition von Verstehen, die verschiedene Theorien des Erklärens berücksichtigt und damit auch die Konzepte der Kausalität und der Vereinheitlichung beinhaltet, ohne diese Konzepte zu notwendigen Voraussetzungen für Verstehen zu machen.

3.9.1 Aronsons und Fairs Transfertheorie

Der Vollständigkeit halber seien zwei weitere prominente Ansätze zur Definition kausaler Verbindungen zumindest erwähnt. Die eine davon hat der Philosoph Jerrold Aronson²³ formuliert. Seine Transfertheorie beruht auf der Annahme, dass nur dann eine kausale Verursachung vorliege, wenn ein Objekt ein anderes berühre (lokal) und dabei eine Größe übertrage, wodurch ein, wie er sagt, ‘unnatürlicher’ Wechsel im Zustand des ersten Objektes stattfindet. Natürliche Veränderungen sind nach Aronson nicht kausal - kausale Änderungen wiederum resultieren aus lokalen Wechselwirkungen mit anderen Körpern. Interne Veränderungen sind für Aronson also keine Fälle kausaler Verursachung.

David Fair²⁴ schließlich geht davon aus, dass die Physik die fundamentale Kausalität beschreibt, nämlich als Transfer von Energie und Impuls. Seiner Meinung nach lassen sich auch Alltagssätze, in denen Verursachungen formuliert werden, letztlich auf physikalische Prozesse reduzieren. Die Aussage ”Johns Ärger ließ ihn Bill schlagen” sei letztlich physikalisch reduzierbar auf Prozesse von Energie und Impulsübertrag. Der detaillierte Vorgang sei aber erst durch eine vollständig vereinheitlichte physikalische Theorie ausformulierbar - ein Kriterium, das viele Philosophen zum Anlass von Kritik nehmen. Sie fragen, wie viel wert eine Kausaltheorie sein solle, die sich möglicherweise nie oder noch sehr lange nicht detailliert ausarbeiten lasse.

²³Vgl. Aronson, J.: On the Grammar of Cause. *Synthese* 22 (1971), S. 417-418.

²⁴Fair, D.: Causation and the Flow of Energy. *Erkenntnis* 14 (1979), S. 219-250.

4 Vereinheitlichende Erklärung

4.1 Kitchers Modell

Eine der bekanntesten Alternativen zur Kausalerklärung ist die vereinheitlichende Erklärung. Ihre Vertreter gehen von der Grundüberlegung aus, dass wissenschaftliches Erklären darin bestehe, ein einheitliches Bild von einer großen Menge verschiedenster Phänomene zu produzieren. Ereignisse oder Phänomene, die zuvor als vereinzelt und unverbunden galten, erhalten plötzlich gemeinsame Erklärungsgrundlagen. Philosophen, wie beispielsweise Michael Friedman oder Philip Kitcher, nennen Newtons Vereinheitlichung von erdbezogenen und Himmelstheorien der Bewegung als Beispiel erfolgreicher Vereinheitlichungsansätze in den Naturwissenschaften. Ein weiteres prominentes Beispiel ist Maxwells Verbindung von Elektrizität und Magnetismus.

Tatsächlich hat der Reduktionismus, dem die Idee einheitlicher Beschreibung zugrunde liegt, in der Physik seit 1900 eine herausragende Position eingenommen und stellte für die Fähigkeit, vereinheitlichende Theorien wie diejenige des Elektro-Magnetismus aufzuspüren und zu formulieren, sicherlich eine treibende Kraft dar.

Es bleibt jedoch die Frage bestehen, ob Vereinheitlichung und Erklärung sinnvoll zusammenhängen. 1974 hat Michael Friedman¹ in seiner Veröffentlichung "Explanation and Scientific Understanding" gezeigt, woran das vereinheitlichende Erklärungsmodell noch arbeiten muss und was es bereits erreicht. 1976 hat Kitcher diese Publikation inhaltlich kritisiert und erweitert, weswegen die vereinheitlichende Erklärung heute meist mit seinem Namen verbunden ist.

¹ Friedman, M.: Explanation and Scientific Understanding. The Journal of Philosophy, Vol. 71, No. 1 (1974), S. 5-19.

4 Vereinheitlichende Erklärung

In dieser Kritik und in weiteren Veröffentlichungen² führt Kitcher einige für die Theorie der vereinheitlichenden Erklärung grundlegende Begriffe ein: Beispielsweise ist demnach ein *schematischer Satz* ein Satz, in dem einige Teile eines Alltagsatzes ersetzt werden durch Buchstaben oder Symbole. Beispielsweise kann nach diesem Schema der Satz: "Sterne, die eine Masse größer als 1,4 Sonnenmassen besitzen, kollabieren am Ende ihres Lebens in ein schwarzes Loch" assoziiert werden mit einer Menge schematischer Sätze, wie beispielsweise: "Sterne, die eine Masse größer als A besitzen, entwickeln sich zu P" oder *Für alle X gilt, dass wenn X sowohl O als auch A ist, dann ist X = P.*

Ferner sind so genannte *Füllungsvorschriften* Vorschriften, die angeben, wie man die Buchstaben A, P etc. in die schematischen Sätze einzufügen hat. Beispielsweise können uns solche Vorschriften sagen, dass wir den Buchstaben A durch den Begriff 'Stern' oder den Namen eines spezifischen Sterns zu ersetzen haben und P durch 'schwarzes Loch'.

Schematische Argumente wiederum sind Folgen von schematischen Sätzen. *Klassifikationen* beschreiben, welche Sätze in schematischen Argumenten Prämisse und welche Folgerungen sind und welche Ableitungsregeln (welche logischen Regeln) verwendet werden.

Zuletzt ist ein *Argumentmuster* ein geordnetes Triplet, das aus einem schematischen Argument, einem Satz von Füllungsvorschriften (eine für jeden Term des schematischen Arguments) und einer Klassifikation des schematischen Arguments besteht. Je mehr Einschränkungen ein Argumentmuster den Argumenten auferlegt, desto 'stringenter' nennt man das Muster.

Greifen wir nun die eben definierten Begriffe auf. Für Kitcher ist eine 'Erklärung' der Versuch, möglichst viele verschiedene Phänomene zu beschreiben, indem man so wenige und stringente Argumentmuster wie möglich wieder und wieder verwendet. Je größer die Menge verschiedener Folgerungen, die man aus einem Argumentmuster ableiten kann, umso vereinheitlichter ist die Erklärung.

Woodward fasst in seinem Aufsatz in der Stanford Encyclopedia of Phi-

²Vgl. Kitcher, P.: Explanatory Unification and the Causal Structure of the World. In: Kitcher, P. und Salmon, W. (ed.): Minnesota Studies in the Philosophy of Science, Volume XIII, University of Minnesota Press, Minneapolis 1989, S. 410-505.

losophy³ Kitchers Sicht zusammen. Demnach vergrößere Wissenschaft unser Verständnis der Natur, indem sie uns zeige, wie man Erklärungen vieler Phänomene erhalte, indem man dasselbe Muster der Ableitung wieder und wieder verwende. Und indem uns die Wissenschaft dies vorführt, lehre sie uns, die Anzahl von Fakten, die wir als ultimativ akzeptieren, zu reduzieren. Gute Erklärungen sind für Kitcher dann in letzter Konsequenz solche Muster, die besser abschneiden als andere - nach den Kriterien, die oben aufgestellt wurden.

4.2 'Herkunft' und 'Entwicklung'

Antwortet man auf die Frage, warum der Schatten eines Fahnenmastes eine bestimmte Länge habe, damit, dass der Mast selbst eine Länge habe - die unter Berücksichtigung der Sonneneinstrahlung und des Terrains zu eben jener Länge des Schattens führe - so halten wir dies für eine Erklärung der Schattenlänge. Umgekehrt aber sprechen wir nicht von einer befriedigenden Erklärung, wenn die Höhe des Mastes durch die Länge des Schattens erklärt wird. Dieser Asymmetrie liegt unser Verständnis zugrunde, dass nur die eine Richtung der Ableitung einen Erklärwert besitzt.

Nach Kitcher liegt das Prinzip dessen, was wir im obigen Beispiel als Erklärung verstehen, in der so genannten 'origin and development'-Struktur (*OD*): Herkunft und Entwicklung seien in einer Erklärung also entscheidend. Wir betrachteten Objekte demnach im Allgemeinen so, dass wir nach ihrer Herkunft fragen, nach den 'Bedingungen, unter denen das Objekt entstanden sei und den Modifikationen, die es seither erlebt habe'⁴. Fügten wir zum Erklärungsmuster *P* (der Herkunft des Mastes) noch den Schatten hinzu als zusätzliche Möglichkeit, die Dimension des Mastes herzuleiten, dann erhöht diese 'Schattenerklärung' (*S*) die Anzahl der Argumente in *P* und lässt uns dabei aber keine neuen Schlüsse ziehen. Ließen wir jedoch *OD* aus der Erklärungsstruktur *P* weg (also die Forderung, dass Herkunft und Entwicklung

³ Woodward, J.: Scientific Explanation. Stanford Library of Philosophy, first published Fri May 9, 2003; substantive revision Fri Jan 16, 2009.

⁴Vgl. Kitcher, P.: Explanatory Unification and the Causal Structure of the World. S. 485.

4 Vereinheitlichende Erklärung

in der Erklärung berücksichtigt werden sollen) und fügten stattdessen (S) ein, so könnten wir weniger Folgerungen ableiten als mit OD (nicht alle Objekte besitzen Schatten, beispielsweise, um ihre Eigenschaften abzuleiten). OD ist also eine Struktur, die zu den uns akzeptablen Erklärungsmustern zählt, (S) (der Schatten) hingegen nicht.

4.3 Kritik am vereinheitlichenden Erklärungsmodell

Kitchers vereinheitlichendes Modell ist vielfach kritisiert worden. So bleibt beispielsweise in diesem Modell die Rolle der Kausalität unklar. Zwar sagt Kitcher, dass Kausalität einfach die Erklärungsstrukturen wiedergebe, die wir verwenden - dass also Kausalität auf natürliche Weise in seiner vereinheitlichenden Erklärungsstruktur auftrete; dies ist aber zweifelhaft, wie wir bald feststellen werden.

Ein weiteres Problem in Kitchers Modell ist, dass es die Struktur der Zeitrichtung in Erklärungen nicht erfasst. Beispielsweise sprechen wir durchaus von einer Erklärung der zukünftigen Orte der Planeten, wenn wir ihre gemessenen Orte, Geschwindigkeiten und Bewegungsgesetze angeben können und diese vorhersagen. Andererseits macht es uns stutzig, als Begründung für die jetzigen Orte der Planeten zu hören, dass sie deswegen dort sind, weil sie - nach Anwendung der Bewegungsgesetze - in der Zukunft an bestimmten anderen Orten sein werden. Was uns erklärungsstechnisch seltsam erscheint, wird von Kitchers Modell jedoch gleichwertig behandelt. Beide Male führt das Muster der Erklärung mit derselben Anzahl von Prämissen zu einem Ergebnis. Dennoch scheint es uns intuitiv, als sei nur erstere Beschreibung (heutige Orte, Geschwindigkeiten und Gesetze verursachen spätere Orte) eine Erklärung. Liegt es daran, dass heutige Parameter spätere kausal bedingen? Oder ist es, wie man argumentieren könnte, eine Stärke von Kitchers Modell, dass es die anthropische Sicht (mit Menschen, die an den Zeitpfeil gebunden sind) vernachlässigt und das Konzept der Erklärung generalisiert? In jedem Fall aber wirft dieses Beispiel Zweifel an Kitchers Aussage auf, sein Vereinheitlichungs-

4.3 Kritik am vereinheitlichenden Erklärungsmodell

modell könne die kausalen Strukturen ableiten.

Eine weitere Kritik betrifft Kitchers Begriff der ‘Vereinigung’ oder ‘Vereinheitlichung’ (*“Unification”*), denn der Begriff der Vereinheitlichung wird in den verschiedenen Wissenschaften für höchst verschiedene Probleme verwendet. Manchmal geht es darum, ein Klassifikationsschema zu erschaffen, wie bei biologischen Klassifikationen von Pflanzen oder Tieren. Manchmal geht es um den Aufbau eines einheitlichen mathematischen Rahmens, der auf viele verschiedene Phänomene anwendbar ist. Auf wieder anderen Gebieten geht es darum, physikalische Phänomene zusammenzufassen, die durch dieselbe Ursache bedingt sind und zuvor separat betrachtet wurden.

Die Frage ist, ob Kitchers Vereinheitlichungsansatz für den Begriff der Erklärung diese verschiedenen Nuancen hinreichend differenziert betrachten kann. Denn intuitiv meinen wir, dass der letzte Punkt - die Vereinheitlichung physikalischer Phänomene - viel mit Erklärung zu tun haben muss, während die anderen Punkte nicht unbedingt erklärend wirken. Beispielsweise sehen wir eine Erklärung der Planetenbewegungen darin, dass sie nach Newton derselben Gravitationskraft gehorchen wie frei fallende Körper auf der Erde, und sich folglich demselben Newtonschen Kraftgesetz fügen müssen, woraus sich die Umlaufbahnen ergeben. In anderen Fällen scheint uns ein Klassifikationsschema jedoch weniger über die kausalen Zusammenhänge mitzuteilen als im vorhergehenden Fall. Beispielsweise lässt sich aus der Tatsache, dass ein gemeinsamer mathematischer Formalismus eine Reihe von Phänomenen beschreibt, nicht ableiten, dass all diese Phänomene durch dieselbe Ursache erzeugt werden. Wenn beispielsweise sowohl das Verhalten von Massen als auch das von Ladungen durch Lagrange-Gleichungen beschrieben werden kann, so haben wir damit noch keine Vereinheitlichung oder Vereinigung von Gravitation und Elektromagnetismus erreicht. Der mathematisch einheitliche Rahmen verrät uns nicht automatisch etwas über die kausalen Faktoren, die für die Phänomene verantwortlich sind. Mit dem einheitlichen mathematischen Formalismus geht also nicht automatisch eine einheitliche physikalische Erklärung einher.

Gerade die mathematische Vereinheitlichung passt jedoch ansonsten sehr gut in Kitchers Vereinheitlichungsrahmen. Inwieweit mathematische Vereinheitlichung jedoch erklärend wirkt, bleibt, wie oben angedeutet, fraglich.

4 Vereinheitlichende Erklärung

Besonders kritisch aber ist die Vereinheitlichung in biologischen Modellen zu betrachten: Sicherlich sind Individuen einer bestimmten Klassifikationskategorie zuordenbar (A seien Schmetterlinge), diese Information kann ich benutzen, um viele ihrer Eigenschaften abzuleiten (A haben Flügel, verpuppen sich etc.), und dieses Muster kann immer wieder verwendet werden für viele Arten von A 's. In den meisten Wissenschaften werden solche Schemata jedoch als allein beschreibend und nicht erklärend angesehen, da sie nichts über kausale Mechanismen aussagen, warum A 's beispielsweise überhaupt Flügel besitzen und nicht flügellos sind. Kann Kitchers Modell also die erklärungsstechnisch relevanten von den irrelevanten Fällen von Vereinheitlichung trennen? Darauf scheint es noch keine klare Antwort zu geben.

Wie steht es außerdem mit dem Problem, dass auch Untermengen von ehemaligen und weniger vereinheitlichenden Erklärungsstrukturen schon erklärend wirken, könnte man fragen. Denn unabhängig davon, dass wir möglicherweise immer nur eine Untermenge aller möglichen Erklärungsstrukturen kennen können, funktionieren ja auch solche Strukturen noch immer erklärend, die heute weniger vereinheitlichend sind als die besten derzeit bekannten Strukturen. Die Bewegungsgesetze Galileis zum Beispiel oder das Coulomb oder das Amperesche Gesetz erklären noch immer die Zusammenhänge - obwohl die Einsteinschen Gleichungen oder die Maxwellgleichungen bekannt sind und vereinheitlichender funktionieren. Ist immer nur die vereinheitlichendste Theorie erklärend, oder alle?

Gerne würde man sagen, dass die eine Erklärung eben einfach etwas besser ist als die andere - beide aber Erklärungen an sich darstellen. Das Problem dabei ist jedoch, dass Kitcher zwischen erklärungsstechnischer Relevanz und Irrelevanz (also zwischen Erklärung und Nicht-Erklärung) so unterscheidet, dass das vereinheitlichendste Modell relevant ist für Erklärungen - hingegen das weniger vereinheitlichende irrelevant - und nicht nur weniger relevant.

Kitcher muss diese strikte Sicht jedoch beibehalten, denn würde er diese relaxieren und beispielsweise weniger vereinheitlichende Theorien ebenfalls als Erklärungen (wenn auch schwächere Erklärungen) zulassen, dann säne die Aussagekraft seiner Theorie. Denn während zuvor der Schatten eines Mastes nicht als Erklärung seiner Höhe gelten konnte, weil damit, wie oben analysiert,

4.4 Brücke zwischen ‘Erklären’ und ‘Verstehen’

weniger vereinheitlichend argumentiert werden musste, so würde im Falle einer Aufweichung Kitchers Theorie der Schatten ebenfalls als Erklärung fungieren können - nur eben als schwächere Erklärung als die des vereinheitlichendsten Modells. Dies aber hatte Kitcher ja vermeiden wollen.

Die Stärke seines Modells, gewisse Aussagen als Erklärungen ausschließen zu können, verhindert aber andererseits ein Verständnis dessen, warum manche weniger vereinheitlichenden Theorien, beispielsweise der Physik, dennoch bereits erklärend wirken. Kann denn tatsächlich, wie Kitcher es fordert, kausales Wissen ausschließlich durch Auffinden eines möglichst vereinheitlichenden Erklärungssystems gewonnen werden? Zu fragen bleibt, wie wir überhaupt kausales Wissen erlangen, ob dies beispielsweise durch den Vergleich verschiedener vereinheitlichender Erklärungen und dann die bewusste Auswahl der am meisten vereinheitlichenden gelingt, oder ob vielmehr wir als Kinder bereits durch Erfahrung und ohne großes Wissen über andere Erklärungsstrategien kausale Zusammenhänge entdecken. Es mag möglich sein, dass wir Menschen diesen Prozess der bewertenden Vereinheitlichung unbewusst durchlaufen und letztlich Kitchers Modell erfüllen. Dennoch ist nicht klar, warum dies so sein sollte und wie die biologischen Grundlagen eines solchen Prozesses aussehen sollten.

4.4 Brücke zwischen ‘Erklären’ und ‘Verstehen’

Es scheint, als ließe sich die philosophische Diskussion um die Begriffe des ‘Erklärens’ und des im folgenden Kapitel genauer diskutierten Begriffes des ‘Verstehens’ in zwei Lager einteilen: in die Gruppe derer, die sich ausschließlich mit dem Begriff des wissenschaftlichen Erklärens beschäftigen - wie beispielsweise Hempel, und in die Gruppe derer, die sich ausschließlich mit wissenschaftlichem ‘Verstehen’ beschäftigen, wie beispielsweise Michael Scriven oder William Dray. In Kapitel 5 auf Seite 59 wird in dieser Arbeit der Begriff des wissenschaftlichen Verstehens dann ausführlicher analysiert und eine neue Definition vorgeschlagen. Als Überleitung zwischen den Theorien des Erklärens zu den Theorien des Verstehens sei jedoch Michael Friedmans Kritik an

4 Vereinheitlichende Erklärung

Hempels DN-Modell erwähnt.⁵ Für Friedman stellt sich Hempels DN-Modell gerade deswegen als unvollständig dar, da daraus nicht hervorginge, wo das Verstehen produziert würde:

According to the D-N model, a description of one phenomenon can *explain* a description of a second phenomenon only if the first description *entails* the second. Of course, a deductive relation between two such descriptions is not sufficient for one to be an explanation of the other, as expounders of the D-N model readily admit.

The entailment requirement puts a constraint on the explanation relation, but it *does not by itself* tell us what it is about the explanation relation that gives us *understanding* of the explained phenomenon [...].⁶

Manche der Vertreter des DN-Modells gäben an, so Friedman, dass die Frage nach dem 'Verstehen' außerhalb der Wissenschaftsphilosophie liege, weil es sich dabei um einen psychologischen Begriff handele, der von Individuum zu Individuum variere. Diese Meinung vertrat auch Hempel selbst⁷, wenn er beispielsweise schreibt:

Such expressions as 'realm of understanding' and 'comprehensible' do not belong to the vocabulary of logic, for they refer to psychological or pragmatic aspects of explanation [...] a relative notion, something can be significantly said to constitute an explanation in this sense only for this or that individual [...].⁸

Übersetzt man den Begriff 'pragmatisch' mit 'subjektiv', also mit etwas, das von Individuum zu Individuum variiert, so stimmt Friedman Hempel zu,

⁵ Friedman, M.: Explanation and Scientific Understanding. S. 5-19.

⁶ Friedman, M.: Explanation and Scientific Understanding, S. 7.

⁷ Hempel, C. und Oppenheim, P.: Studies in the Logic of Explanation. Philosophy of Science 15 (1948), S. 135-175.

⁸ Hempel, C. und Oppenheim, P.: Studies in the Logic of Explanation, S. 413.

4.4 Brücke zwischen 'Erklären' und 'Verstehen'

dass der Wissenschaftsphilosoph sich mit den nicht pragmatischen Aspekten der Erklärung beschäftigen sollte, der Frage, wann A B erkläre, und nicht, wann etwas 'für mich oder für Dich' eine Erklärung darstelle.

Übersetze man jedoch 'pragmatisch' mit 'psychologisch', also mit etwas, das mit Überzeugungen zu tun hat und mit persönlichen Einstellungen, dann hält Friedman den Begriff des 'Verstehens' für einen wesentlichen Teil der Wissenschaftsphilosophie, da er sich dann, analog zum Begriff des rationalen Denkens, auf eine große Klasse von Individuen beziehen lasse:

Take the concept of rational belief, for example - presumably, if it is rational to believe a given sentence on given evidence it is so for anyone, and not merely for this or that individual.

Similarly, although the notion of understanding, like knowledge and belief but unlike truth, just is a psychological notion, I don't see why it can't be a perfectly objective one. I don't see why there can't be an objective or rational sense of 'scientific understanding', a sense on which what is scientifically comprehensible is constant for a relatively large class of people. Therefore, I don't see how the philosopher of science can afford to ignore such concepts as 'understanding' and 'intelligibility' when giving a theory of the explanation relation.⁹

Über die Notwendigkeit einer Definition wissenschaftlichen Verstehens hinaus, die für eine große Klasse von Menschen zutreffen kann, sieht Friedman Hempels Versuch, Verstehen über Erwartbarkeit eines Phänomens zu erklären kritisch. Nach Hempel wäre beispielsweise die Tatsache, dass wir durch das Ablesen eines Barometers einen Sturm vorhersagen können, erklärend. Für Friedman ist jedoch eine Unterscheidung wichtig. Wissenschaftliche Erklärungen sind danach nicht identisch mit entstehendem Verstehen:

Scientific explanations may involve the provision of grounds for believing that the explained phenomena occur, but it is not in virtue

⁹Friedman, M.: *Explanation and Scientific Understanding*, S. 8.

4 Vereinheitlichende Erklärung

of the provision of such grounds that they give us understanding.¹⁰

Rationale Erwartung und Verständnis sind nach Meinung Friedmans zwei verschiedene Dinge, wobei Erklärung im DN-Modell wohldefiniert sei - Verstehen hingegen lasse sich aus der Erwartung von Phänomenen seiner Meinung nach nicht ableiten. Die zweite erfolgreiche Herangehensweise an den Begriff des Erklärens - das Vereinheitlichungsmodell - hält Friedman intuitiv für attraktiver. Allerdings könne es ebenfalls nicht erklären, wie Verstehen entstehe. Die zentrale These des vereinheitlichenden Modells bestand ja eben darin, dass Phänomene, die uns ähnlich zu anderen Phänomenen scheinen, damit verstehbarer werden. Dies könne man jedoch leicht widerlegen. So zitiert Friedman beispielsweise Kitcher:

[...] being familiar, just like being expected, is not at all the same thing as being understood. We are all familiar with the behavior of household appliances like radios, televisions, and refrigerators; but how many of us understand why they behave the way they do?¹¹

Wenngleich Friedman selbst keine eigene überzeugende Theorie des Verstehens aufstellt, formuliert er Eigenschaften, die eine Theorie des Verstehens haben sollte:

- Sie sollte sich möglichst auf alle Wissenschaften anwenden lassen.
- Der Zusammenhang zwischen Erklärung und Verstehen sollte klar werden.
- Sie sollte objektiv sein und nicht von Individuen und historischen Geschmäckern abhängen.

Wir werden im Folgenden einen Verstehensbegriff vorschlagen, der den ersten beiden Forderungen Friedmans an eine Theorie des Erklärens genügt.

¹⁰Ebd., S. 9.

¹¹Ebd., S. 10.

4.4 *Brücke zwischen 'Erklären' und 'Verstehen'*

Individuelle und historische Bewertungen werden in dem in dieser Arbeit vorgestellten Begriff schließlich berücksichtigt, ohne dass wissenschaftliches Verstehen dadurch subjektiv würde.

5 Wissenschaftliches Verstehen

Wie wir im vergangenen Kapitel gesehen haben, existiert eine große Spannbreite von Theorien des Erklärens, zwischen denen bislang kein Konsens besteht. Es fehlt eine einheitliche Theorie des Erklärens; eine Erklärung dessen, was alle Erklärungen 'erklärend' macht. Die vorliegende Arbeit wird argumentieren, dass wissenschaftliches Verstehen diese vereinheitlichende Basis bilden kann: Alle Theorien des Erklärens sollen uns Verstehen ermöglichen. Durch die hier folgende Analyse soll gezeigt werden, wie die verschiedenen Modelle des Erklärens dieses Verstehen erzeugen.

5.1 Ist Verstehen epistemisch relevant?

Die meisten Wissenschaftsphilosophen behaupten, dass dasjenige Modell der Erklärung, das sie verfolgen, auch Verstehen produziere. Allerdings gehen nur wenige von ihnen genauer darauf ein, was sie tatsächlich meinen, wenn sie von Verstehen sprechen oder wie es aus einer kausalen oder vereinheitlichenden Analyse folgen soll. Im 19. Jahrhundert stand das mechanistische Modellbild exemplarisch für das Verstehen eines wissenschaftlichen Problems. 1884 zitierte William Thomson in seinen Baltimore Lectures eine Aussage von Lord Kelvin:

It seems to me that the test of 'Do we or do we not understand a particular subject in physics?' is 'Can we make a mechanical model of it?' [...] I never satisfy myself until I can make a mechanical model of a thing. If I can make a mechanical model, I can understand it. As long as I cannot make a mechanical model all the way through, I cannot understand it.¹

¹Thomson, W.: Notes of Lectures on Molecular Dynamics. Baltimore 1884, S. 132.

5 Wissenschaftliches Verstehen

Die moderne Physik stützt sich jedoch nicht mehr allein auf die Modelle der klassischen Mechanik. Was verstehbar ist und verstanden wird, bezieht heute einen weitaus größeren Kreis von Theorien mit ein als allein klassisch-mechanistische Modelle - einen Kreis, der sich historisch erweitert hat.

Dass die Wissenschaft Verstehen tatsächlich als eines ihrer Ziele verfolgt, ist nicht eindeutig nachweisbar. Dass wissenschaftliches Verstehen überhaupt ein wichtiges epistemisches Ziel der Wissenschaft sein soll, haben einige Philosophen bestritten. Hempel beispielsweise vertrat die Meinung, dass es eine Verbindung zwischen Erklärung und Verstehen gäbe, hielt jedoch wissenschaftliches Verstehen nicht für fundamental.

Such expressions as 'realm of understanding' and 'comprehensible' do not belong to the vocabulary of logic, for they refer to the psychological and pragmatic aspects of explanation.² Very broadly speaking, to explain something to a person is to make it plain and intelligible to him, to make him understand it. Thus construed, the word explanation and its cognates are pragmatic terms: their use requires reference to the persons involved in the process of explaining. [...] Explanation in this pragmatic sense is thus a relative notion: something can be significantly said to constitute an explanation in this sense only for this or that individual.³

Folglich sei eine Analyse des Begriffes des Verstehens für die Wissenschaftsphilosophie nicht relevant.

Ähnlich wie Hempel bestreiten auch andere Philosophen, wie beispielsweise J. D. Trout, die epistemische Relevanz des wissenschaftlichen Verstehens und halten es für ein subjektives Phänomen, das keine Rolle bei der Bewertung wissenschaftlicher Theorien spielen sollte. So schreibt Trout:

²Hempel, C.: *Aspects of Scientific Explanation and other essays in the philosophy of science.* Free Press, New York 1965, S. 413.

³Ebd., S. 425-426.

5.1 Ist Verstehen epistemisch relevant?

[...] many forms of cognitive achievement do not involve a sense of understanding, and [...] only the truth or accuracy of an explanation makes the sense of understanding a valid cue to genuine understanding.⁴

Historische Untersuchungen zeigen, dass Wissenschaftler verschiedener historischer Perioden eine Menge verschiedener Ziele verfolgten. Larry Laudan beispielsweise folgert daraus, dass es unmöglich sei, überhaupt zentrale Ziele der Wissenschaften zu formulieren:

We have seen time and time again that the aims of science vary, and quite appropriately so, from one epoch to another, from one scientific field to another, and sometimes among researchers in the same field.⁵

In dieser Arbeit soll die Auffassung vertreten werden, dass wissenschaftliches Verstehen eines der wesentlichen zugrunde liegenden Ziele aller Wissenschaften darstellt, das sich durch alle Zeiten hindurch erhalten hat. Ferner soll dafür argumentiert werden, dass sich verschiedene weitere Ziele der Wissenschaft, die historisch oder in bestimmten Forschungsgebieten von Relevanz waren, als Facetten wissenschaftlichen Verstehens erweisen.

Tatsächlich kann man den Begriff des Verstehens nicht ohne implizite oder explizite Referenz zu menschlichen Agenten verwenden: Ein Wissenschaftler versteht ein Phänomen mit Hilfe einer bestimmten Theorie. Über diese Referenz hinaus ist der Begriff des Verstehens auch pragmatisch: Aufgrund kontextueller Unterschiede kann ein Phänomen von einem anderen Wissenschaftler beispielsweise erst mit Hilfe einer anderen Theorie verstanden werden.

In Bezug auf die Quantenmechanik, die uns im Folgenden beschäftigen wird, bedeutete das beispielsweise, dass viele Physiker in Kopenhagen um 1925 davon ausgingen, dass sich Phänomene aus dem Bereich der Atomphysik mit

⁴Trout, J. D.: Scientific Explanation and the Sense of Understanding. *Philosophy of Science* 69, No. 2 (2002), S. 212-233.

⁵Laudan, L.: Normative naturalism. *Philosophy of Science* 57 (1990), S. 47-50.

5 Wissenschaftliches Verstehen

Hilfe der von Werner Heisenberg entwickelten Matrixtheorie würden verstehen lassen. Andere Physiker, wie beispielsweise Erwin Schrödinger, gingen jedoch davon aus, dass die Matritzenmechanik kein Verstehen der atomaren Prozesse liefern würde - was Schrödinger dazu veranlasste, seine Wellenmechanik weiter zu entwickeln. Bas van Fraassen definiert solche pragmatischen Vorzüge (virtues) einer Theorie als

[...] specifically human concerns, a function of our interests and pleasures, which make some theories more valuable and appealing to us than others. [...] Values of this sort however [...] cannot rationally guide our epistemic attitudes and decisions.⁶

Anders als von Hempel, van Fraassen oder Trout wird in dieser Arbeit jedoch die Auffassung vertreten, dass die pragmatische Natur des Verstehens die epistemische Relevanz nicht schmälert. Im Gegensatz zu Hempel und van Fraassen wird nicht davon ausgegangen, dass das wichtigste epistemische Ziel der Wissenschaften, grob gesprochen, die Produktion faktischen Wissens über natürliche Phänomene darstellt. Vielmehr wird das Verstehen für eines der wesentlichen zugrundeliegenden Ziele der Wissenschaften gehalten.

Um diese Annahme zu motivieren, betrachten wir ein anschauliches Beispiel. Nehmen wir an, wir besäßen eine Wahrsagerkugel aus schwarzem Glas, die uns auf jede Frage eine Antwort gäbe. Stellen wir uns ferner vor, jede dieser Antworten würde sich bei experimenteller Überprüfung als adäquat herausstellen. Dennoch würden wir hier nicht von einem großen wissenschaftlichen Erfolg sprechen, da keine Argumentation dahingehend existiert, wie diese perfekten Vorhersagen erzeugt werden. Die schwarze Kugel produziert scheinbar beliebige Vorhersagen. Wissenschaftler jedoch wollen mehr: Sie suchen nach Einsichten - nach einem Weg, die schwarze Kugel zu öffnen und die Theorie zu sehen, die die Vorhersagen produziert. Dabei besteht die Hoffnung, dass die Theorie nicht wieder eine weitere schwarze Kugel darstellen wird. Anders als bei einer schwarzen Kugel sollen wissenschaftliche Theorien durchschaubar sein; Wissenschaftler wollen verstehen, wie die Vorhersagen entstehen und ein Gefühl entwickeln für extrapolierbare Konsequenzen.

⁶*Fraassen*, van B.: *The Scientific Image*. Oxford: Clarendon Press 1980, S. 87.

5.2 Bekannte Modelle wissenschaftlichen Verstehens

Viele moderne Autoren gehen davon aus, dass wissenschaftliche Erklärungen Verstehen produzieren. Sie verfechten dabei meist ein spezielles Modell der Erklärung und verbinden Verstehen mit gerade den Vorzügen ihres Ansatzes, dies jedoch ohne weitere Begründung.⁷ Keiner von ihnen erläutert genauer, worin Verstehen besteht, um dann zu zeigen, wie es durch wissenschaftliches Erklären produziert wird. In dieser These soll der Entwurf einer allgemeinen Theorie wissenschaftlichen Verstehens präsentiert werden, die die zuvor präsentierten Theorien des Erklärens berücksichtigt.

5.2.1 Kausal-mechanistisches Verstehen

Wesley Salmon geht davon aus, dass kausale Verbindungen einen wesentlichen Bestandteil wissenschaftlichen Verstehens darstellen. In seinem Buch "Scientific Explanation and the Causal Structure of The World" präsentiert er seine im vorangegangenen Kapitel vorgestellte Theorie der kausal-mechanistischen Erklärung. Die zwei wesentlichen Elemente dieser Theorie sind kausale Interaktionen und kausale Prozesse, die den kausalen Einfluss übertragen. Dabei verwendet Salmon ein Konzept der Kausalität, bei dem kausale Ketten relevant sind: kontinuierliche Raumzeit-Trajektorien, entlang derer Energie und Impuls - oder: Erhaltungsgrößen - transportiert werden. Die Verbindung zum wissenschaftlichen Verstehen sieht Salmon in eben diesen kausalen Strukturen:

[...] causal processes, causal interactions, and causal laws provide the mechanisms by which the world works; to understand why

⁷Vgl. *Salmon, W.:* Scientific Explanation and the Causal Structure of the World. Princeton University Press, Princeton 1984.

Salmon, W.: Causality and Explanation. Oxford University Press, Oxford 1998, S. 79 ff.

Weber, E.: Explanation, understanding and scientific theories. Erkenntnis 44 (1996), S. 1.

Schurz, G. und Lambert, K.: Outline of a theory of scientific understanding. Synthese 101 (1994), S. 109.

5 Wissenschaftliches Verstehen

certain things happen, we need to see how they are produced by these mechanisms [...] underlying causal mechanisms hold the key to our understanding of the world [...]⁸

Eine kausale Theorie wird in Salmons Analyse also mit einer verstehbaren Theorie gleichgesetzt. Der kausal-mechanistischen Erklärung wird somit ein höherer Status eingeräumt, da sie nach Salmon im Gegensatz zu anderen Theorien des Erklärens wissenschaftliches Verstehen ermöglicht.

Wir werden im Folgenden jedoch sehen, dass die Quantenmechanik für Salmons monistisches Konzept wissenschaftlichen Verstehens ein Problem darstellt. Dies kann besonders deutlich am so genannten EPR-Paradoxon exemplifiziert werden, auf das wir in den folgenden Kapiteln ausführlich eingehen werden. Dabei geht es um zwei Teilchen, die sich über raumartige Distanzen hinweg korreliert verhalten.

Salmon vertritt die These, dass jede empirische Korrelation einer kausalen Erklärung bedarf, entweder mit Hilfe einer gemeinsamen Ursache (common cause) oder durch eine direkte kausale Verbindung. Im EPR-Fall jedoch sind die Teilchen raumartig entfernt, was eine kausale Verbindung, die sich an die Schranke der Lichtgeschwindigkeit hält, ausschließt; die notwendige Verletzung der so genannten Bellschen Ungleichungen schließt überdies eine gemeinsame Ursache aus.

Es zeigt sich, dass Salmons Konzept kausalen Verstehens in Anwendung auf die Theorie der Quantenmechanik auch dort problematisch wird, wo die Theorie sich möglicherweise als fundamental indeterministisch erweist. Allerdings haben Physiker dennoch versucht, eine kausale Theorie der Quantenmechanik zu formulieren, wie beispielsweise David Bohm⁹, der eine kausalprozessurale Theorie der Quantenmechanik formulierte. Auch der amerikanische Philosoph Tim Maudlin¹⁰ hat sich Salmons These bezüglich der kausalen Erklärungsbedürftigkeit von Korrelationen angeschlossen und versucht, eine

⁸Salmon, W.: Scientific Explanation and the Causal Structure of the World. S. 260.

⁹Vgl. Bohm, D.: A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of 'Hidden' Variables. In: Physical Review 85, Nr. 2 (1952), S. 166-179.

¹⁰Maudlin, T.: Quantum Non-Locality and Relativity. Blackwell Publishing, Oxford 1994.

5.2 Bekannte Modelle wissenschaftlichen Verstehens

kausale Deutung der EPR-Korrelationen zu ermöglichen. Beide Ansätze werden im Folgenden ausführlich analysiert.

Wir werden sehen, dass man in Bezug auf indeterministische Deutungen der Quantentheorie (wie beispielsweise der Kopenhagener Deutung) sehr wohl von Verstehen sprechen kann, dass Kausalität also keine Voraussetzung für Verstehen darstellt. Im Laufe der folgenden Analyse wird sich zeigen, welche Rolle die Suche nach einer kausalen Deutung der Quantenmechanik spielt und wie sie sich motivieren lässt.

Kausal-mechanistische Modelle des Verstehens spielten an vielen Punkten in der Geschichte der Wissenschaft und in vielen Theorien eine wichtige Rolle. Im gesamten 19. Jahrhundert beispielsweise war das Konzept dominant vertreten. Dennoch war es nie die Norm: Beispielsweise wurde Newtons Theorie dafür kritisiert, dass sie Wirkung über eine Distanz hinweg postulierte, also das Cartesianische Prinzip der Nahwirkung verletzte. Dies war für viele Physiker zwischen 1700 und 1850 ein wesentlicher Makel an Newtons Gesetzen. Auch Newton selbst war mit seiner Theorie nicht zufrieden: "It is inconceivable that inanimate brute matter should, without the mediation of something else which is not material, operate upon and affect other matter without mutual contact."¹¹

Trotzdem vertraten viele Physiker und Philosophen in dieser Zeit die Newtonsche Theorie und das Prinzip der Wirkung aus der Distanz heraus, wie beispielsweise Kant, Helmholtz, Weber oder Laplace. Die Kontakttheorie der Gravitationskraft, wie Leonhard Euler sie formulierte, wurde zu dieser Zeit vollständig ignoriert. Erst 1850 wurde das Konzept der Nahwirkung und kausaler Prozesse durch das Aufkommen von Äthertheorien wieder zu einem Standard.

¹¹Newton, I., Turnbull, W. (ed.): *The Correspondence of Isaac Newton: Volume 3*. Cambridge University Press, Cambridge 1960, S.: 1688-1694.

5 Wissenschaftliches Verstehen

Es zeigt sich also, dass historisch und verschiedenen Gebieten der Wissenschaften, das Prinzip der Kausalität keinen absoluten Standard für Verstehbarkeit wissenschaftlicher Theorien darstellt - Salmons Konzept bedeutet einen wichtigen Baustein für wissenschaftliches Verstehen, aber nicht den einzigen. Manche Philosophen wie beispielsweise Henk de Regt und Dennis Dieks haben daher angenommen, dass die Verstehbarkeit wissenschaftlicher Theorien vom historischen Kontext abhängt: "[The] intelligibility of scientific theories [...] is essentially contextual, [...] [it] depends on contextual factors, and can change in the course of time."¹²

In dieser Arbeit wird die These vertreten, dass sich die Grundlage dessen, was wissenschaftliches Verstehen ausmacht, im Laufe der Zeit nicht ändert, sondern dass verschiedene Zeitalter und verschiedene wissenschaftliche Forschungsgebiete vielmehr unterschiedliche Aspekte eines allgemeinen Begriffes 'wissenschaftlichen Verstehens' aufdecken. Der historische Kontext wird hier letzten Endes unter den individuellen Kontext des Wissenschaftlers subsumiert, wie wir im Folgenden ausführen. Es soll dafür argumentiert werden, dass wissenschaftliches Verstehen unabhängig vom historischen Kontext umso besser gelingt, je mehr unterschiedliche Forderungen an eine wissenschaftliche Theorie erfüllt werden.

Die von Salmon eingeführte Forderung eines kausal-mechanistischen Modells besitzt nach unserer Argumentation keinen privilegierten Status in einem absoluten Sinne. Kausalität ist nur eine von mehreren Forderungen an eine Erklärung, die zu einem besseren wissenschaftlichem Verstehen führen.

5.2.2 Vereinheitlichendes Verstehen

Wie wir im vorangehenden Kapitel erläutert haben, ist eine der bekanntesten Alternativen zum Salmonschen Modell die vereinheitlichende Erklärung oder die vereinheitlichende Theorie wissenschaftlichen Verstehens. Diese nimmt an, dass Theorien Verstehen erzeugen, indem sie ein möglichst vereinheitlichtes Bild der Welt präsentieren. Dieses Modell der Vereinheitlichung wurde, wie im

¹² *Regt, de H., Dieks, D.: A Contextual Approach to Scientific Understanding. Synthese 144 (2005), S. 137-170.*

5.2 Bekannte Modelle wissenschaftlichen Verstehens

vorgehenden Kapitel ausgeführt, u.a. von Friedman vertreten, der die Theorie vereinheitlichenden Erklärens und somit wissenschaftlichen Verstehens folgendermaßen resümierte:

Science increases our understanding of the world by reducing the total number of independent phenomena that we have to accept as ultimate or given. A world with fewer independent phenomena is, other things equal, more comprehensible than one with more.¹³

Das Friedmansche Modell der Vereinheitlichung wurde jedoch aufgrund wesentlicher Kritik durch Salmon¹⁴ schließlich 1981 von Kitcher¹⁵ wesentlich erweitert, beziehungsweise auch weiterentwickelt von Schurz und Lambert¹⁶. Wie im vorangehenden Kapitel ausführlicher erläutert, nehmen in Kitchers Erweiterung Argumentationsstrukturen (argument patterns) eine zentrale Position ein:

Understanding the phenomena is not simply a matter of reducing the fundamental incomprehensibilities but of seeing connections, common patterns, in what initially appeared to be different situations. [...] Science advances our understanding of nature by showing us how to derive descriptions of many phenomena, using the same patterns of derivation again and again [...]¹⁷

Das Kitchersche Modell besitzt viele Vorzüge, beispielsweise dass es sich sehr allgemein anwenden lässt. So erlaubt dieser Ansatz beispielsweise auch,

¹³ Friedman, M.: Explanation and scientific understanding, S. 15.

¹⁴ Vgl. Salmon, W.: Four Decades of Scientific Explanation. University of Minnesota Press, Minneapolis 1990, S. 94-101.

¹⁵ Kitcher, P.: Explanatory unification. Philosophy of Science 48 (1981), S. 507-531.

Kitcher, P.: Explanatory unification and the causal structure of the world. In: Scientific Explanation, University of Minnesota Press, Minneapolis 1989, S. 410-505.

¹⁶ Schurz, G. und Lambert, K.: Outline of a theory of scientific understanding. Synthese 101 (1994), S. 109.

¹⁷ Kitcher, P.: Explanatory unification and the causal structure of the world, S. 432.

5 Wissenschaftliches Verstehen

dass die indeterministische Quantenmechanik Verstehen erzeugt - ein Einwand, mit dem Salmons Theorie kritisiert worden war. In der Tat hat die Suche nach Vereinheitlichung die Physik zu allen Zeiten dominiert. Wie bereits erwähnt, stellt Maxwells Theorie des Elektromagnetismus ein wichtiges Beispiel dafür dar, wie die Suche nach Vereinheitlichung zu erfolgreicheren physikalischen Theorien führte. Dennoch ist dabei nicht klar, ob die Suche nach Vereinheitlichung motiviert war durch die Suche nach mehr Verständnis der Welt. Tatsächlich haben beispielsweise Margaret Morrison¹⁸ oder zuvor auch Eric Barnes¹⁹ dagegen argumentiert, dass Vereinheitlichung und Verstehen gleichzeitig Ziele der Wissenschaften darstellen müssen. Selbst, wenn dies doch der Fall sein sollte, würde es noch nicht implizieren, dass Vereinheitlichung auch Verstehen erzeugt, beziehungsweise eine herausgehobene Rolle für das Entstehen wissenschaftlichen Verstehens spielen muss - oder dass Verstehen von Theorien erst nach einer Vereinheitlichung mit anderen Theorien möglich wäre. Beispielsweise bedeutete Bohrs 1913 vorgebrachte Atomtheorie eine Vereinheitlichung von Spektralanalyse und Quantisierungsprinzip. Dennoch betrachteten viele Physiker die Theorie als nicht wesentlich Verstehen erzeugend, da sie Prinzipien, wie beispielsweise die Stetigkeit der Veränderung, nicht berücksichtigte und als axiomatisch gilt.

Es zeigt sich, dass Vereinheitlichung eine effektive Forderung an eine Erklärung darstellt, die zu Verstehen führt. Allerdings erweist es sich, ähnlich wie für Salmons kausales Modell, dass der Vereinheitlichung als solcher kein herausgehobener Status für die Erzeugung wissenschaftlichen Verstehens zugeordnet werden kann. Vereinheitlichung scheint eine Forderung neben weiteren zu sein, die wissenschaftliches Verstehen ermöglichen.

¹⁸Vgl. *Morrison, M.: Unifying Scientific Theories Physical Concepts and Mathematical Structures.* Cambridge University Press, Cambridge 2000.

¹⁹Vgl. *Barnes, E.: Explanatory unification and scientific understanding.* In *PSA*, Vol. 1 (1992), East Lansing: Philosophy of Science Association, S. 3-12.

5.3 Die Bündeltheorie des Verstehens

Wir haben argumentiert, dass Verstehen ein wesentliches Ziel der Wissenschaften darstellt. Daraus folgt unmittelbar, dass wissenschaftliches Verstehen Theorien bedarf, die verstehbar sind. Diese Verstehbarkeit ist dabei mehr als nur ein abstraktes Ziel. Verstehbarkeit erweist sich bereits für den wissenschaftlichen Prozess der Forschung als nützlich, denn Wissenschaftler müssen Theorien applizieren, um Vorhersagen zu treffen und Phänomene zu erklären. Nicht nur das Wissen um Gesetze und Hintergrundannahmen allein ermöglicht es, Theorien anzuwenden und Vorhersagen zu treffen - dafür bedarf es auch gewisser Fähigkeiten des Anwenders dieses Wissens. Dieser praktische Aspekt ist keineswegs trivial. In modernen Theorien besteht die Anwendung einer Theorie im Allgemeinen nicht aus einer einfachen Deduktion. Die Anwendung eines Modells auf ein reales System bedarf einer komplizierten Näherung, für die meist keine formalen Vorschriften existieren - dies scheint nur dann möglich, wenn der Wissenschaftler die Theorie 'verstehet', wodurch die Verstehbarkeit einer Theorie für das Fortschreiten der Forschung an Relevanz gewinnt.

Es wird in dieser Arbeit stets vorausgesetzt, dass die Theorien, von denen hier die Rede ist, zunächst den gewöhnlichen Bedingungen an physikalische Theorien genügen, also alle logischen, empirischen und methodologischen Bedingungen erfüllen. In diesem Sinne wird beispielsweise ein Wahrsager, der zukünftige Entwicklungen zu verstehen meint, nicht in unserem Sinne diese Strukturen 'verstehen'.

Bei der Frage, wann eine Theorie verstehbar ist, erinnern wir uns an das vorangehende Beispiel der schwarzen Kugel, die adäquate Vorhersagen treffen konnte. Dort hatten wir motiviert, dass Wissenschaftler mehr suchen als eine adäquate Vorhersage: dass sie vielmehr verstehen möchten, wie die Vorhersage zustande kommt.

Wie bereits im vorhergehenden Kapitel erwähnt, ist es möglich, aus einem Formalismus Vorhersagen abzuleiten, also Formeln und Symbole zu manipulieren, ohne bereits ein tiefes Verständnis der Theorie zu besitzen. Richard Feynman, dessen Zitat über die Unverstehbarkeit der Quantenmechanik eingangs die Frage nach der Natur des Verstehens aufwarf, zitiert in seinen "Lectures

5 Wissenschaftliches Verstehen

on Physics” eine Aussage von Paul Dirac. Dieser definierte das Verstehen eines mathematischen Zusammenhangs über die Möglichkeit, eine Lösung intuitiv zu erschließen, ohne mathematische Rechnungen durchzuführen: ”I understand what an equation means if I have a way of figuring out the characteristics of its solution without actually solving it.”²⁰

Physikalisches Verstehen sieht Feynman, Diracs Definition des Verstehens eines mathematischen Zusammenhanges folgend, als letztlich unmathematisch, unpräzise, ein ’unexaktes Ding’²¹, und dennoch absolut notwendig für einen Physiker. An dieser Stelle möchten wir, motiviert von diesem Ansatz, folgende sowohl *notwendige als auch hinreichende Bedingung K* für das Verstehen wissenschaftlicher Theorien vorschlagen:

***K:** Eine Theorie ist für einen Wissenschaftler in einem gegebenen Kontext dann verstehbar, wenn er empirisch adäquate qualitative Vorhersagen treffen kann, ohne exakte Rechnungen durchzuführen.*²²

Unter einem Kontext wird dabei eine Menge von Faktoren verstanden, die den Wissenschaftler charakterisieren: wie beispielsweise dessen Fähigkeiten, sein Wissen und seine persönlichen Überzeugungen. Zu den Überzeugungen wiederum gehören diejenigen Forderungen oder Kriterien ($\kappa_i (i = 1, 2, 3, \dots)$) an eine wissenschaftliche Erklärung, die der Wissenschaftler für sein eigenes Verständnis der Theorie als besonders wesentlich gewichtet. Diese Bedingungen für Verstehen κ_i stellen pragmatische Kriterien für wissenschaftliches Verstehen dar: Zu ihnen gehören die von uns zuvor ausführlich diskutierten Kriterien wie Vereinheitlichung, Kausalität oder auch noch zu diskutierende Aspekte wie Stetigkeit der Veränderung etc. Das Auswählen der jeweils für

²⁰Feynman, R.: The Feynman Lectures on Physics, Volume II. Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts 1964, Kap. 2-1.

²¹[...] ”an inexact thing” (Kap. 2-1).

²²Eine ähnliche Bedingung wird verwendet in *Regt*, de H.: Ludwig Boltzmann’s Bildtheorie and Scientific Understanding. Synthese, Volume 119, Numbers 1-2 (1999). Dort wird *K* jedoch weder als notwendig noch hinreichend für Verstehen betrachtet und eine von dieser Arbeit abweichende Schlussfolgerung erreicht.

5.3 Die Bündeltheorie des Verstehens

das Verstehen wesentlichen Kriterien κ_i erfolgt individuell, aufgrund persönlicher Vorlieben - und nicht aufgrund von Superiorität einer dieser Forderungen gegenüber einer anderen.

Es gilt zu fragen, ob das Kriterium K für wissenschaftliches Verstehen wirklich hinreichend und notwendig ist. Dazu müsste einerseits folgen, dass die Möglichkeit, qualitativ adäquate Vorhersagen zu treffen, eine hinreichende Bedingung für Verstehen darstellt, sowie andererseits, dass Verstehen hinreichend ist dafür, eine solche Vorhersage zu treffen. Erstere Richtung ist erfüllt, da bei Nichtverstehen keine empirisch adäquate Vorhersage getroffen werden kann (dies wird in dieser These gerade so definiert). Umgekehrt gilt auch, dass ohne die Möglichkeit, eine Vorhersage treffen zu können, noch kein Verstehen der Theorie eingetreten ist.

Bevor wir zu Letzterem ein Beispiel betrachten, muss hier noch vorausgesetzt werden, dass die Vorhersage des Wissenschaftlers sich nicht auf ein gerade zuvor durchgeführtes Experiment oder ein Phänomen mit bekanntem und immer gleichem Ausgang bezieht. Dann wäre K trivialerweise erfüllt, wäre aber kein Kriterium für das Verstehen einer Theorie. Nehmen wir unter dieser Vorbedingung an, ein Wissenschaftler könnte keine intuitiven Vorhersagen über einen bestimmten Sachverhalt treffen oder trafe nach seiner Schlussfolgerung eine empirisch nicht adäquate Vorhersage - kann er eine Theorie dennoch verstanden haben? Wir betrachten dazu das Beispiel eines Physikers, der sich jahrelang mit Quantenmechanik beschäftigt hat. Beim Aufbau eines neuen Experimentes wird ihm die Frage gestellt, was er als Resultat erwarte. Kann der Wissenschaftler keine oder nur eine falsche qualitative Vorhersage treffen, so hat er nach Meinung der vorliegenden These die Theorie der Quantenmechanik tatsächlich (noch) nicht verstanden.

Es soll dabei jedoch nicht unerwähnt bleiben, dass im Alltag durchaus auch davon gesprochen wird, dass ein Forscher eine Theorie 'zu Teilen' verstehe, wenn er unter bestimmten Umständen für bestimmte Phänomene zuverlässig empirisch adäquate Vorhersagen treffen könne. Dieser Einwand macht darauf aufmerksam, dass die Definition einer 'Theorie' nicht immer intuitiv eindeutig ist. Teile einer Theorie können unter Umständen eine eigene, in sich geschlossene Theorie darstellen, die in Anwendung auf eine kleine Menge natürlicher

5 Wissenschaftliches Verstehen

Phänomene adäquate Vorhersagen erlaubt. So ist beispielsweise die Elektrostatik eine abgeschlossene Subtheorie der Elektrodynamik - insofern als die Elektrodynamik die statischen Phänomene beinhaltet. Könnte also ein Experte für elektrostatische Phänomene keine Vorhersage über das Verhalten schwingender Dipole treffen, so hätte er zwar die Theorie der Elektrostatik verstanden, nicht aber bereits die Theorie der Elektrodynamik. Dennoch hätte er, trüfe er immer empirisch adäquate Vorhersagen für elektrostatische Probleme, die Teiltheorie der Elektrostatik im Sinne des Kriteriums K verstanden.

Dieser Einwand entkräftigt also nicht das notwendige und hinreichende Kriterium K , sondern weist nur darauf hin, dass bei der Frage nach dem wissenschaftlichen Verstehen einer Theorie die Reichweite der jeweils betrachteten Theorie für die Situation festgelegt werden muss.

Betrachten wir nun zur Exemplifizierung des notwendigen und hinreichenden Kriteriums für Verstehen K ein berühmtes Beispiel, nämlich Ludwig Boltzmanns kinetische Gastheorie. In der Thermodynamik ist bekannt, dass für ideale Gase ein Zusammenhang zwischen Druck und Temperatur besteht. Um zu zeigen, ob man die Theorie der Thermodynamik für ideale Gase 'versteht', gilt es also beispielsweise abzuleiten, wie dieser Zusammenhang sich qualitativ gestaltet. Eine solche Ableitung gelingt über eine Interpretation. Boltzmann interpretiert ein Gas in einem Container als ein Ensemble von sich frei bewegenden nicht-wechselwirkenden Atomen. Dieses atomare Bild ermöglicht K : Es erlaubt ein qualitatives Begreifen des makroskopischen Verhaltens des Gases. Beispielsweise lässt sich so die Tatsache, dass ein Gas einen Druck auf die Wände eines Containers ausübt, dadurch beschreiben, dass seine Konstituenten mit den Wänden kollidieren und in der Summe durch Impulsübertrag eine Kraft ausüben. Diese Kraft pro Fläche entspricht dann dem makroskopisch messbaren Druck. Weiterhin lässt sich in diesem Bild die Temperatur eines Gases beschreiben durch die mittlere Geschwindigkeit der Atome: Je schneller sich die Teilchen im Mittel bewegen, desto heißer ist das Gas. Eine Erhitzung des Gases bedeutet also eine Erhöhung der mittleren Geschwindigkeit der Teilchen, aus denen das Gas sich zusammensetzt.

Aus Boltzmanns bildhafter Beschreibung ergibt sich ein qualitatives Verstehen der Relationen zwischen den Eigenschaften Druck, Temperatur und Vo-

5.3 Die Bündeltheorie des Verstehens

lumen eines Gases. Ohne Rechnung ist unmittelbar einsichtig, dass der Druck eines Gases mit dessen Temperatur steigen wird. Denn erhöht man die Temperatur des Gases, so steigen die Geschwindigkeiten der Atome. Diese kollidieren folglich mit einem höheren Impuls mit der Wand und übertragen somit eine größere Kraft. Gerechnet auf dieselbe Wandfläche führt diese höhere Kraft zu einem höheren messbaren Druck. Dieser Zusammenhang nennt sich Boyle'sches Gesetz. Boltzmanns Interpretation des idealen Gases als sich aus Atomen zusammensetzend ermöglicht eine qualitative Vorhersage im Sinne des Kriteriums K . Visualisierbarkeit, die Annahme unabhängig existierender Individuen (Moleküle mit von der Umgebung unabhängigen Eigenschaften) sowie die Prinzipien der Kausalität (Moleküle verursachen Stöße) und das Prinzip der Vereinheitlichung (Vorstellung atomarer Teilchen als klassische Kugeln) erweisen sich in diesem Zusammenhang als ein *Bündel von Bedingungen*, die dazu beitragen, dass K möglich wird. Keine dieser in der Boltzmannschen Interpretation auftauchenden Bedingungen ist allein hinreichend oder notwendig für die Möglichkeit einer qualitativ adäquaten Vorhersage und somit für K , aber sie gemeinsam erhöhen die Wahrscheinlichkeit, dass K möglich wird.

Unter der hier vorgeschlagenen Voraussetzung, dass alle Bedingungen κ_i gleich gewichtet sind, wollen wir demnach vorschlagen, dass sich das Verstehen einer Theorie über einen *Bündelbegriff* ausdrücken lässt, wobei gilt, dass, *je mehr Kriterien κ_i im Rahmen der Interpretation einer Theorie erfüllt werden, umso höher die Wahrscheinlichkeit, dass mit Hilfe dieser Theorie eine empirisch adäquate qualitative Vorhersage möglich ist und somit K als notwendige und hinreichende Bedingung für Verstehen erfüllt wird.* Wir wollen also immer dann von einer möglichst verstehbaren Theorie sprechen, wenn möglichst viele Kriterien κ_i auf die Interpretation einer Theorie zutreffen. Es ist dabei nicht notwendig für Verstehen, dass alle möglichen κ_i zutreffen, sondern nur, dass möglichst viele aus dem Bündel erfüllt sind.

Es soll an dieser Stelle nicht unerwähnt bleiben, dass die Tatsache, dass sich die Thermodynamik idealer Gase auf die Statistik reduzieren lässt, hier nicht mit wissenschaftlichem Verstehen verbunden werden soll. Eine reduktive Theorie kann Verstehen erzeugen - muss dies aber nicht unbedingt aufgrund ihrer Reduktion tun. So ist die Elektrostatik ein in sich verstehbares Gebiet.

5 Wissenschaftliches Verstehen

Nach ihrer Vereinheitlichung mit der Elektrodynamik können elektrostatische Probleme als ein Grenzfall elektrodynamischer Phänomene betrachtet werden. Die Elektrostatik wird somit auf einen Grenzfall einer umfassenderen Theorie reduziert - dies erzeugt jedoch nicht erst Verstehen, sondern Verstehen war auch schon in der und durch die Theorie der Elektrostatik möglich.

Obiges Beispiel bedeutet für sich einen Fortschritt in der Suche nach einem Begriff des Verstehens, nämlich eine Antwort auf die Kritik, die wir zuvor an Theorien des Verstehens richteten. Während kausal-mechanistische oder vereinheitlichende Theorien des Erklärens nur postulierten, dass gerade ihre Methode zu wissenschaftlichem Verstehen führe, haben wir anhand des obigen Beispiels gezeigt, wie mit Hilfe kausaler Schlussfolgerungen Verstehen erzeugt wird. Es zeigt sich, was die kinetische Beschreibung zu einer Erklärung macht: indem nämlich Kausalität als Hilfsmittel fungiert, um wissenschaftliches Verstehen im Sinne von K zu erzeugen.

5.3.1 Bündelkriterien: Visualisierbarkeit und Individuen

Oben wurde ein notwendiges und hinreichendes Kriterium K (siehe S. 70) für die Verstehbarkeit wissenschaftlicher Theorien vorgeschlagen. Wir haben ferner weitere Forderungen, ein Bündel von Bedingungen κ_i , an wissenschaftliches Verstehen präsentiert. Unter diesen wurden die Bedingungen 'Kausalität' und 'Vereinheitlichung' bereits ausführlicher diskutiert.

Wir stellen fest, dass um K zu erfüllen, also intuitiv Voraussagen einer physikalischen Theorie produzieren zu können, ein konzeptueller Rahmen benötigt wird, der es ermöglicht, die Rechnung zu umgehen und einen intuitiven Schluss auf das Ergebnis zu erzielen. Im Folgenden versuchen wir, eine möglichst umfassende Liste der für das Verstehen physikalischer Theorien relevanten Forderungen an eine Theorie, κ_i , aufzustellen und zu diskutieren. Diese Liste erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, enthält aber alle wesentlichen in modernen physikalischen Theorien auftretenden Prinzipien.

Viele Physiker wie Richard Feynman, aber auch Farady, Maxwell oder Schrödinger, haben die Möglichkeit einer *Visualisierung* für eine essentielle Bedingung für das Verstehen von Theorien gehalten. So bieten beispielsweise

5.3 Die Bündeltheorie des Verstehens

die Feldlinien in der Elektrostatik für Feynman ein ideales Spielfeld, in dem sich Intuition ausbilden kann. Die Möglichkeit einer Visualisierung ist auch in der modernen Wissenschaft ein effektives Mittel, Intuition zu fördern. Beispielsweise vermitteln die so genannten Feynman-Graphen, bei denen einfliegende Teilchen miteinander interagieren und wieder auseinanderfliegen, den Eindruck eines raumzeitlichen Prozesses von Punktteilchen. Tatsächlich jedoch stehen sie für mathematische Terme in einem Integral, dessen Resultat eine Wahrscheinlichkeitsamplitude beispielsweise in einem Streuprozess darstellt. Obwohl die einzelnen Graphen nicht wirklich für einen physikalisch-raumzeitlichen Prozess stehen (die Interaktion findet nicht raumzeitlich, sondern im so genannten Impulsraum statt und jeder Graph steht für ein (vierdimensionales) Integral über den Impuls), ermöglichen sie doch ein intuitives Begreifen der mikroskopischen Vorgänge durch eine Analogie mit klassischen Kugeln und raumzeitlichen Pfaden. Dies wiederum ermöglicht kreatives Nachdenken, welche weiteren Terme zu einer Streuamplitude beitragen könnten (beispielsweise durch weitere Interaktionen der ein- und ausfliegenden Teilchen mit virtuellen Teilchen der Umgebung, eine andere Reihenfolge der Kollisionen oder andere Endprodukte). Murray Gell-Mann bezeichnete die Möglichkeit, durch Feynman-Graphen verstehen zu wollen, als eine Illusion:

In QED, as in other quantum field theories, we can use the little pictures invented by my colleague Richard Feynman, which are supposed to give the illusion of understanding what is going on in quantum field theory.²³

In der vorliegenden Arbeit wird argumentiert, dass Feynman-Graphen mehr vermitteln als eine Illusion des Verstehens. Als ein Element des Bündels von Forderungen κ_i an eine Theorie können sie tatsächlich qualitative Vorhersagen ermöglichen und so, in einem gegebenen Kontext, Verstehen im Sinne des Kriteriums K erzeugen. Das Unbehagen, das in Gell-Manns Worten zum Ausdruck kommt, findet sich auch in der berühmten Veröffentlichung von Ein-

²³Gell-Mann, M.: Questions for the Future. 8th Wolfson Lecture, in: Mulvey, J. (ed.): The Nature of Matter. Clarendon Press, Oxford 1980, S. 169-198.

5 Wissenschaftliches Verstehen

stein, Rosen und Podolski, in der das EPR-Paradoxon als Beispiel für unser Unverständnis der Quantentheorie vorgestellt wird. Wie wir unten argumentieren werden, steht dieses Unbehagen und scheinbare Nicht-Verstehen nicht im Widerspruch zu der hier präsentierten Definition von Verstehen im Sinne von *K*.

Visualisierungen können also die Vorhersagekraft erhöhen, indem sie sichtbar, anschaulich machen - mit unserer Anschauung verbinden -, abstrakte Daten und Zusammenhänge in eine visuell erfassbare Form bringen. Das dahinter liegende Ziel ist, ein kohärentes Weltbild zu erzeugen. Wesentliche Merkmale begleiten jede Visualisierung: Beispielsweise greift jede Visualisierung auf individuelle Agenten oder Systeme - auf *Individuen* - zurück. Eine Veranschaulichung bedeutet letzten Endes, abstrakte Objekte durch klassische Systeme anzunähern, wobei unter klassischen Systemen alle Entitäten verstanden werden, die im Raum individuiert und in ihren Eigenschaften unabhängig von der Umgebung sind. Im Falle des Blotzmann-Bildes des idealen Gases waren diese Individuen einzelne Punktteilchen, mit denen die Atome approximiert wurden, im Falle der Feynman-Graphen individuelle Teilchen. Es muss aber kein Punktteilchen vorliegen, damit wir von Individuen sprechen - es geht allgemein um veranschaulichbare Entitäten. Darunter kann beispielsweise auch eine Wasseroberfläche fallen oder komplexere Gebilde wie ausgedehnte starre oder deformierbare Körper - also alle unteilbaren oder teilbaren Systeme, deren Verhalten sich unter bestimmten Umständen klassisch mit Hilfe einer einzelnen Funktion beschreiben lässt. Unter einer Entität wird an dieser Stelle also alles verstanden, das raumzeitlich individuiert werden kann. Wie wir bei der Analyse des EPR-Paradoxons noch genauer sehen werden, baut der Begriff der Individuen auf den Prinzipien der *Separabilität* - Unabhängigkeit der Eigenschaften eines Objektes von der Umgebung - und der *Kontextunabhängigkeit* - Unabhängigkeit der Eigenschaften von der Form ihrer Messung - auf. Diese Begriffe werden an entsprechender Stelle in Bezug auf das EPR-Paradoxon ausführlich diskutiert und stellen weitere Bündelkriterien κ_i für wissenschaftliches Verstehen dar.

Der Versuch, ein kohärentes Weltbild dadurch zu erreichen, dass Abstraktes durch Klassisches visualisiert wird, lässt sich motivieren: Ein Wissenschaftler

5.3 Die Bündeltheorie des Verstehens

ist aus seinem Lebensalltag daran gewöhnt, mit Objekten seiner Anschauung - mit klassischen Objekten - umzugehen. Diesen Kontext seiner Alltagserfahrungen bringt er mit, wenn er eine Theorie verstehen will - und dieser Kontext ermöglicht dann auch das Verstehen abstrakter Zusammenhänge. Visualisierung, bei der der klassische Erfahrungsschatz verwendet wird (klassische Entitäten), um abstrakte Zusammenhänge zugänglich zu machen, ist insofern auch vereinheitlichend, als man dabei versucht, für alle Naturphänomene eine einheitliche (und möglicherweise minimale) Basis von Entitäten zu formulieren, mit deren Hilfe sich unterschiedliche Theorien visualisieren lassen.

Letztendlich gilt für das Kriterium der Visualisierung und der Verwendung von Individuen jedoch dasselbe wie für Kausalität oder Vereinheitlichung: Zwar tragen alle als Kriterien κ_i wesentlich zum Verstehen bei und können, wenn sie im Bündel der κ_i einer Theorie auftreten, die Wahrscheinlichkeit für das Möglichwerden von K erhöhen; doch weder kann der Veranschaulichung oder dem Verwenden von individuellen Objekten ein prominenterer Status als anderen Forderungen an eine verstehbare Theorie eingeräumt werden, noch sind sie notwendig für das Verstehen.

Ein Beispiel, bei dem Verstehen auch ohne Visualisierung gelingt, ist die Analyse einer Funktion, die einen physikalischen Zusammenhang beschreibt. Betrachtet ein geübter Physiker die Funktion, so erkennt er, wo sie beispielsweise Polstellen oder Extremwerte besitzt. Dieses 'Erkennen' spielt sich ohne Visualisierung, rein aufgrund mathematischer Regeln und Erfahrung ab. Dasselbe gilt für das Lösen physikalischer Differentialgleichungen.

Auch Separabilität ist nicht hinreichend für Verstehen. Die Quantenmechanik liefert mit dem EPR-Experiment ein Beispiel, in dem qualitative Vorhersagen gelingen, obwohl das Prinzip der Separabilität verletzt ist. In diesem später noch ausführlich diskutierten Experiment gelingt nach der Messung eines Teilchens eine exakte Vorhersage für das Ergebnis an einem zweiten Teilchen. Sowohl die Korrelation als auch die Ergebnisse lassen sich qualitativ vorhersagen.

In diesem Sinne stimmen die meisten Physiker zu, die Quantenmechanik 'verstanden' zu haben. Warum viele Physiker, wie auch Albert Einstein, Nathaniel Rosen oder Boris Podolski, die Theorie der Quantenmechanik dennoch

als unverstanden bewerteten²⁴, wird in einem folgenden Kapitel diskutiert.

5.3.2 Stetigkeit und Analogie

Ein weiteres Kriterium aus dem Bündel der Kriterien, die *K* (siehe S. 70) ermöglichen, ist das Prinzip der *Stetigkeit bei Veränderung*. Propagiert ein klassisches Objekt durch den Raum, so vollführt es dabei keine Sprünge; seine Weltlinie in einem Minkowski-Diagramm besitzt keine Lücken. Verwendet man die in dieser Arbeit favorisierte Definition der Kausalität, wie Salmon sie vorschlägt, also kausale Prozesse als solche, die Erhaltungsgrößen lokal übertragen, aufzufassen, so stimmt das Prinzip der Stetigkeit nahezu mit dem schon zuvor als Teil des Bündels anerkannten Prinzip der Kausalität überein.

Die Energieniveaus eines Atoms stellen jedoch ein Beispiel dar, bei dem Verstehen auch ohne Stetigkeit möglich ist: denn obgleich wir beispielsweise mit dem Bohrschen Atommodell qualitative Vorhersagen treffen können, sind die Übergänge der Elektronen zwischen verschiedenen Energieniveaus nicht notwendigerweise als klassische kontinuierliche Pfade vorstellbar. Ganz im Gegenteil gehen Standarddeutungen der Spektren eines Atoms davon aus, dass die Elektronen zwischen den Energieniveaus springen; dass sie sich also zu einem Zeitpunkt auf einem Niveau aufhalten und zu einem späteren möglicherweise auf einem anderen, ohne jemals die Energiewerte dazwischen angenommen zu haben. Die Einschränkung, die Übergänge seien nicht notwendigerweise als klassische Pfade vorstellbar, soll an dieser Stelle nur darauf hinweisen, dass mit der Bohrschen Theorie der Quantenmechanik auch eine Interpretation existiert, die von klassischen Bahnen beim Übergang zwischen Energieniveaus ausgeht. Dort stellen die Energieniveaus nur Gleichgewichtszustände dar, die Energiewerte zwischen den Niveaus sind den Elektronen jedoch nicht prinzipiell unmöglich.

Ein weiteres Bündelkriterium ist das Auffinden von *Analogien*. Viele Physiker halten die Möglichkeit, Analogien zu anderen physikalischen Theorien herzustellen, für eines der wichtigsten Instrumente, um Verstehen zu errei-

²⁴Vgl. *Einstein, A., Podolski, B., Rosen, N.*: Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Phys. Rev.* 47 (1935), S. 777-780.

5.3 Die Bündeltheorie des Verstehens

chen: "Analogy is perhaps the physicist's most powerful conceptual tool for understanding new phenomena or opening new areas of investigation."²⁵

Ein berühmtes Beispiel für eine erfolgreiche Analogie ist das eben bereits kurz erwähnte Bohrsche Atommodell. Dieses entstand, als Ernest Rutherford und Niels Bohr die Bahnen der Elektronen um den Atomkern (die den Energieniveaus entsprachen) mit den Bahnen der Planeten um die Sonne verglichen. Wenngleich dieses Modell später durch Schrödingers Atomorbitale ersetzt wurde, führte es doch zu qualitativen Vorhersagen bezüglich des Verhaltens von Elektronen beim Übergang zwischen Energieniveaus. Analogien können vereinheitlichend wirken, müssen es jedoch nicht: Beispielsweise bedeutete die Analogie zwischen bohrschem Atommodell und newtonschen Planetenbahnen eben nicht, dass beide Theorien vereinigt wurden; aus diesem Grunde haben wir die Analogie separat von der Vereinheitlichung erwähnt. Ein weiteres Beispiel für den Erfolg einer Analogie sind die Energieniveaus des Positroniums, eines gebundenen Zustandes zwischen einem Elektron und einem Positron. Diese ließen sich vorhersagen, als man das gebundene System mit dem bereits bekannten Wasserstoffatom verglich, bei dem ein Elektron und ein Proton gebunden sind. Eine ähnliche Analogie erbrachte qualitativ adäquate Vorhersagen für gebundene Zustände eines Quarks und eines Antiquarks (Quarkonium).

Im Zusammenhang mit Theorien des Erklärens hatten wir sowohl die *kausalen Theorien* als auch die *vereinheitlichenden Theorien* als weitere Bündelkriterien κ_i identifiziert. Dabei hatten wir festgestellt, dass auch diese Kriterien keine notwendigen Bedingungen für wissenschaftliches Verstehen darstellen. Dies liegt im Falle kausaler Erklärungen daran, dass, wie wir sehen werden, auch akasale Theorien der Quantenmechanik im Sinne des von uns vorgestellten Kriteriums K zu Verstehen führen.

Vereinheitlichende Theorien wiederum erweisen sich deswegen als nicht notwendig für Verstehen, da neuen physikalischen Ansätzen nicht immer gleich die Vereinigung mit anderen physikalischen Modellen gelingt und sie dennoch im Sinne von K verstanden werden können. Beispielsweise erlaubte die Theorie

²⁵ Telegdi, V.: Scientific American 206 (1962), S.50; zitiert aus: Povh, B.: Particles and nuclei: an introduction to the physical concepts. Springer-Verlag GmbH, Berlin/Heidelberg 2004, S. 117.

der schwachen Wechselwirkung qualitative Vorhersagen für Prozesse, bei denen nur die schwache Kraft relevant war, wie beispielsweise den Beta-Zerfall. Als 1967 die Vereinheitlichung der schwachen Kraft mit der elektromagnetischen Kraft möglich wurde, über das GSW-Modell von Sheldon Glashow, Abdus Salam und Steven Weinberg²⁶ dieselben Lepton number as the fourth color, Physical Review D, Band 10, 1974, S. 275, gelang auch die Beschreibung und Vorhersage für Prozesse wie die Kollision von Elektron und Positron bei bestimmten Energien, bei denen ein Z-Boson, ein Teilchen der schwachen Wechselwirkung, erzeugt wird. Dennoch besaßen beide Einzeltheorien auch vor der Vereinheitlichung schon Vorhersagekraft und ließen sich gemäß *K* 'verstehen'.

5.3.3 Lokalität und Symmetrien

Aus dem in dieser Arbeit verwendeten Kausalbegriff, der dem intuitiven Begriff der Kausalität in der Physik am nächsten kommt, folgt auch, dass *Lokalität* ein weiteres Kriterium des Bündels von Bedingungen an eine Theorie darstellt, denn die Übertragung von Erhaltungsgrößen verwendet das Kontaktprinzip. Wie sich im Folgenden zeigen wird, gelingen trotz mangelnder Lokalität in kausalen Deutungen der Quantentheorie qualitative Vorhersagen. Lokalität kann also keine hinreichende oder notwendige Bedingung für Verstehen darstellen. Dennoch halten viele Physiker das Lokalitätsprinzip, also lokale Wirkungsübertragung, für ebenso sakrosankt wie das Prinzip der *Energieerhaltung*. Letzteres wollen wir jedoch unter dem Begriff der *Symmetrien*, die ein weiteres Prinzip des Bündels darstellen, subsumieren.

Symmetrien bedeuten für Physiker mindestens zweierlei: einerseits mathematische Einfachheit, andererseits aber auch, im Gegensatz zur Symmetriebrechung, eine nicht weiter begründbare oder hinterfragbare Tatsache, ein Gegebenes, eine Hintergrundannahme. Statt fragen zu müssen, warum eine Symmetrie vorliegt, wird in der Physik vielmehr gefragt, warum keine Symmetrie vorliegen sollte. Die wichtigsten Symmetrien betreffen den Raum, die Zeit und Rotationen. Räumliche Symmetrie bedeutet Translationssymmetrie: Die physikalischen Gesetze sollten sich nicht dadurch verändern, dass ich sie an einem

²⁶Vgl. Griffiths, D.: Introduction to Elementary Particles. Wiley-VCH Verlag 2008, S. 338ff.

5.3 Die Bündeltheorie des Verstehens

anderen Ort ausführe. Dies impliziert auch, dass unser Universum im Mittel in allen Richtungen gleich aussehen sollte. Symmetrie der Zeit bedeutet ebenfalls Translationssymmetrie: aber eben in der Zeit. Demnach sollte es keinen Unterschied machen, ob ich ein Experiment heute oder morgen durchführe, die physikalischen Gesetze sollten sich über die Zeit hinweg nicht ändern. Rotationssymmetrie ermöglicht Vorhersagen über bestimmte Lösungen: Beispielsweise gehen Physiker davon aus, dass die Lösung eines rotationssymmetrischen Problems in vielen Fällen selbst wieder rotationssymmetrisch ist. Dies begründet, warum Sterne kugelförmig sind: denn die Gravitationskraft hängt nur vom Abstand, nicht aber vom Winkel ab. Daher fallen Materiewolken zu maximal symmetrischen, also sphärischen Objekten zusammen.

Somit erhöht die Annahme einer Symmetrie die qualitative Vorhersagekraft. Darüber hinaus sind Symmetrien jedoch nicht immer nötig für das Verstehen. Manche Prozesse in der Natur laufen asymmetrisch ab - wie beispielsweise die Zunahme der Entropie in geschlossenen Systemen. Die Annahme von Zeitsymmetrie führt in diesem Fall zu einer empirisch nicht adäquaten Vorhersage.

Mit Symmetrien gehen Erhaltungssätze einher. Emmy Noether entdeckte 1918 das Prinzip, wonach zu jeder kontinuierlichen Symmetrie eines physikalischen Systems eine Erhaltungsgröße gehört, und umgekehrt.²⁷ Unter kontinuierlichen Symmetrien werden dabei Symmetrien verstanden wie Translationssymmetrie oder Rotationssymmetrie, nicht aber beispielsweise Spiegelsymmetrie. So folgt aus der Homogenität der Zeit (Zeittranslationsinvarianz) die Erhaltung der Energie; aus der des Raumes (Translationsinvarianz) die Erhaltung des Impulses und aus der Gleichförmigkeit (Isotropie) des Raumes (Rotationsinvarianz) schließlich die Erhaltung des Drehimpulses. Aufgrund des Noether-Theorems haben wir die einzelnen Erhaltungssätze der Physik hier nicht als einzelne Kriterien κ_i aufgeführt. Da in der Bündeltheorie des Verstehens, wie sie hier dargelegt wird, nicht gefordert wird, dass die κ_i unabhängig sein müssen, könnte jeder Erhaltungssatz ein solches κ_i darstellen, da die Erhaltung bestimmter Größen zu qualitativen Aussagen führt.

²⁷Noether, E.: Invariante Variationsprobleme. Nachr. D. König. Gesellsch. D. Wiss. Zu Göttingen, Math-phys. Klasse 1918: S. 235-257.

5 Wissenschaftliches Verstehen

Ein anschauliches Beispiel für die qualitative Voraussagekraft der Impulserhaltung sind zwei Eisläuferinnen, die sich an den Händen fassen und sich danach voneinander abstoßen. Während zuvor ihr Gesamtimpuls in ihrem Ruhesystem Null betrug, bewegen sie sich anschließend (*actio = reactio*) unter Annahme gleicher Masse (gleichen Gewichtes) mit gleichen, aber entgegengesetzten Geschwindigkeiten voneinander fort.

Symmetrien oder Erhaltungssätze können jedoch verletzt sein und deswegen ihre Annahme zu qualitativ falschen Vorhersagen führen. Beispielsweise gilt das Prinzip der Energieerhaltung in der Quantenmechanik nur bedingt. Es kann auch verletzt sein. Diese Situation liegt beispielsweise vor, wenn ein Elementarteilchen für kurze Zeit Energie aus dem Vakuum borgt, um damit beispielsweise eine Potentialbarriere zu durchtunneln. Diese geborgte Energie muss von dem Teilchen innerhalb einer kurzen Zeitspanne Δt wieder an das Vakuum zurückgegeben werden, um die Energie-Zeit-Unschärfe zu erfüllen ($\Delta E \Delta t \geq \hbar$, wobei \hbar das Plancksche Wirkungsquantum, eine sehr kleine Zahl, darstellt).

Eine berühmte Symmetrieverletzung ist die Verletzung der so genannten C-Symmetrie, einer diskreten Symmetrie zwischen Materie und Antimaterieteilchen²⁸. Diese Symmetrie bedeutet, dass das Universum genauso aussähe, wenn jedes Teilchen durch sein Antiteilchen ersetzt würde. Wäre C-Symmetrie erhalten, so folgte, dass im Urknall gleich viele Materie- wie Antimaterieteilchen entstanden wären. Wenn Materie und Antimaterie aufeinandertreffen, löschen sie sich jedoch aus und es entsteht ein energiereiches Photon. Kurz nach dem Urknall war das Universum so wenig ausgedehnt, dass alle Materie- und Antimaterieteilchen einander hätten begegnen müssen. Dies hätte dazu geführt, dass heute weder Materie noch Antimaterie übrig wäre und das ganze Universum nur mit Strahlung gefüllt wäre. Aufgrund einer minimalen Verletzung der C-Symmetrie zugunsten der Materie war jedoch kurz nach dem Urknall ein kleiner Materieüberschuss vorhanden - der heute die gesamte Materie konstituiert, die wir beobachten. Die Annahme erhaltener C-Symmetrie hätte folglich zu einer empirisch nicht adäquaten Vorhersage geführt.

²⁸Diskrete Symmetrien, wie beispielsweise die Spiegelsymmetrie, werden im Unterschied zu kontinuierlichen Symmetrien durch diskrete mathematische Gruppen beschrieben.

5.3.4 Lorentzinvarianz, Einfachheit und Mechanismen

Lorentzinvarianz, benannt nach Hendrik Lorentz, spiegelt das relativistische Prinzip wider, wonach die Lichtgeschwindigkeit in allen Inertialsystemen konstant ist. Dieses Prinzip führt zu relativistischen Effekten wie der Längenkontraktion oder der Zeitdilatation. Dieses Prinzip lässt sich für qualitative Vorhersagen nutzen. Weiß man beispielsweise, dass die Zeit auf bewegten Systemen langsamer vergeht, so kann man vorhersagen, dass ein von der Erde mit hoher Geschwindigkeit (nahe Lichtgeschwindigkeit) ins All reisender Zwilling seinen Bruder auf der Erde nach einem Jahr eigener Reisezeit gealtert vorfinden wird: aufgrund der Beschleunigung, die der Reisende im Raumschiff erfährt, ist die Symmetrie der Situation gebrochen und die Zeit auf dem Raumschiff nicht im Gleichklang mit der Erdzeit. In dem relativistisch bewegten System, in der Rakete des reisenden Zwillings, ist sie deutlich langsamer vergangen.

Lorentzinvarianz aufzugeben gilt für viele Physiker als unmöglich, auch deswegen, weil dies unseren experimentellen Ergebnissen widerspräche. Dennoch sind viele Kollaps-Interpretationen der Quantentheorie, die von einer prozessural-physikalistischen Deutung des Kollapses ausgehen, zunächst manifest nicht lorentzinvariant. Auch in der später ausführlicher diskutierten kausalen Kollaps-Deutung von Tim Maudlin geschieht der so genannte Kollaps der Wellenfunktion instantan über einen weiten Raumbereich hinweg und ist somit kein lorentzinvarianter Prozess.²⁹ Will man die Deutung letztlich lorentzinvariant machen, muss man andere Prinzipien (weitere Forderungen aus dem Bündel der κ_i) unter Umständen aufgeben, wie beispielsweise das Prinzip der Einfachheit, nach dem eine Theorie möglichst wenige Annahmen machen sollte und möglichst wenige Parameter oder Annahmen besitzen sollte, die sich nicht aus der Theorie heraus bestimmen lassen.

Dass eine Theorie, die nicht der Forderung nach Einfachheit genügt, dennoch Verstehen erzeugen kann, beweist die Bohmsche Theorie. In dieser muss der Ortskoordinate (als verborgenem Parameter) ein spezieller Status eingeräumt werden. Wie wir später sehen, ist dies ein Postulat, das die Bohmsche

²⁹Tim Maudlin findet letzten Endes mit Hilfe der Flemingschen Hyperebenentheorie eine lorentzinvariante Formulierung seiner kausalen und zunächst nicht manifest lorentzinvarianten Theorie.

5 *Wissenschaftliches Verstehen*

Theorie zusätzlich annimmt und das die Bohmsche Deutung gegenüber der Kopenhagener komplizierter macht. Die Vorhersagekraft der Bohmschen Deutung entspricht jedoch der Kopenhagener, trotz möglicherweise mangelnder Einfachheit.

Schließlich seien noch kausale Mechanismen als eine weitere Forderung an eine Theorie erwähnt. Diese spielten historisch eine wichtige konzeptionelle Rolle beim Erzeugen von Verstehen. Dennoch kann der Begriff des Mechanismus heutzutage nicht mehr ohne Weiteres wörtlich genommen werden, da viele Mechanismen in physikalischen Theorien heute keine Mechanismen im alltäglichen Sinne des Wortes mehr darstellen. Ein aktuelles Beispiel aus der modernen Elementarteilchenphysik ist der so genannte Higgs-Mechanismus. Bei ihm wird ein zusätzliches Feld in die Lagrange-Funktion eines Systems eingeführt. Dessen Grundzustandsenergie ist dadurch ungleich Null, wodurch eine so genannte spontane Symmetriebrechung hervorgerufen wird. Die neue Lagrange-Funktion kann dann interpretiert werden als Zustandsfunktion für massive Teilchen, also Teilchen mit einer Masse, die ungleich Null ist. Hier liegt kein kausaler Mechanismus vor, sondern eine rein mathematische Beziehung.

5.3.5 Stürme und Fahnenmasthöhen verstehen

Welche dieser oben vorgestellten Bündelkriterien oder Forderungen an eine Theorie bezüglich Verstehbarkeit ein Wissenschaftler heranzieht, hängt von seinem individuellen persönlichen und sozialen Kontext ab: Welche mathematischen Methoden stehen zur Verfügung? Welche der Forderungen ist dem Wissenschaftler aus seinem Forschungsumfeld vertraut? Welche wird er also als besonders wesentlich gewichten, wenn es um Verstehen von Theorien geht? Nur wenn die Forderungen und die mathematischen Methoden dem Wissenschaftler vertraut sind, können sie erfolgreich angewendet werden und zu Verstehen führen. Dabei gilt, dass je mehr hinreichende Bedingungen für wissenschaftliches Verstehen erfüllt sind, umso besser das Verstehen ausfällt.

Es gilt zu betrachten, wie sich der hier vorgestellte Begriff des Verstehens gegen bekannte Einwände gegen das DN-Modell oder gegen die erklärende Funktion von Korrelationen behauptet. Dazu werden wir die beiden im ersten

5.3 Die Bündeltheorie des Verstehens

Kapitel vorgestellten Beispiele - das des fallenden Barometers bei nahendem Sturm und des Schattens des Fahnenmastes vor einem Opernhaus - sowie einen Korrelationsfall noch einmal im Licht des hier vorgestellten Verstehensbegriffes analysieren.

Im Falle des Barometers geht es um das Problem, dass die Deduktion des nahenden Sturmes durch das Ablesen des Barometers noch nicht zu einem Verstehen des Sturms und seines Auftretens führt. Tatsächlich liegt hier durch den niedrigen Luftdruck eine gemeinsame Ursache vor, die die Erklärung ermöglicht. Das Ablesen des Barometers und die Vorhersage erfüllt als solches noch nicht unser Kriterium für Verstehen K : Dies liegt daran, dass das Ablesen sich nicht auf eine bestimmte Theorie bezieht, mit Hilfe derer Vorhersagen ohne Rechnungen möglich sein sollten. Das Barometer ist nur ein Indikator für eine zukünftige Entwicklung, nicht Teil einer Theorie. Andererseits kann man argumentieren, dass das Ablesen des Barometers auf den niedrigen Luftdruck hindeutet, der wiederum in einer meteorologischen Theorie mit dem Auftreten des Sturmes verbunden ist. Wenn ein Physiker eine Schlussfolgerung aus dem niedrigen Luftdruck zieht und daraufhin die Vorhersage des Sturmes eintrifft, so ist unser Kriterium für wissenschaftliches Verstehen erfüllt.

Im Falle des Fahnenmastes haben wir im vorhergehenden Kapitel argumentiert, dass es problematisch ist zu entscheiden, ob die Länge des Fahnenmastes die Länge des Schattens 'erklärt' oder umgekehrt. Die gefühlte Asymmetrie der Erklärung wurde in den vorgestellten Theorien des Erklärens nicht oder nicht letztlich befriedigend berücksichtigt (siehe Kapitel 1). Die Alltagsintuition einer Asymmetrie basiert auf einer Favorisierung kausalen Argumentierens. Dennoch haben wir oben argumentiert, dass kausalen Erklärungen keine herausragende Rolle bei der Entstehung von Verstehen zugeordnet werden kann. Auch innerhalb der Physik gibt es kausale Theorien, die nicht unserer Alltagsintuition von Kausalität entsprechen. So existieren beispielsweise in der so genannten Absorber-Theorie des Lichts und der Materie von Wheeler und Feynman auch Photonen, die in der Zeit rückwärts laufen und Wirkung übertragen, so dass die Ursache nach der Wirkung eintreten kann. Kausale Ketten können in dieser Theorie in beide Richtungen verlaufen.

Es zeigt sich, dass es in diesem Fall vom Kontext des Wissenschaftlers

5 Wissenschaftliches Verstehen

abhängt, ob er über die Schattenlänge die Höhe des Mastes versteht oder umgekehrt. Die Alltagserfahrung basiert auf dem Prinzip der kausalen Schlussfolgerungen, das wir als nicht hinreichend für Verstehen identifiziert hatten. Das Feynman- und Wheeler-Beispiel zeigt, dass kausale Erklärungen auch in von unserer Erfahrung umgekehrter Weise funktionieren. Welche Richtung bevorzugt wird, hängt meiner Meinung nach von der individuellen Gewichtung der Kriterien für Verstehbarkeit durch den jeweiligen Wissenschaftler ab.

5.3.6 Was verstehen Physiker nicht an der Quantentheorie?

Betrachten wir zuletzt noch das Beispiel einer Korrelation ohne gemeinsame Ursache, wie beispielsweise im Einstein-Podolski-Rosen-(EPR)-Fall, auf den wir später noch genauer eingehen werden. In einem solchen Fall lässt sich ein Messergebnis aufgrund des Eintretens eines anderen Messergebnisses vorhersehen. Verstehen wir folglich die Theorie, wenn wir eine empirisch adäquate Vorhersage für das zweite Messergebnis treffen können? Da bei der oben gegebenen Bedingung für wissenschaftliches Verstehen K (siehe S. 70) kein kausaler Zusammenhang gefordert wurde, muss die Frage positiv beantwortet werden.

Es stellt sich folglich die Frage, warum viele Physiker, wie beispielsweise Einstein, Rosen oder Podolski, dann meinen, die EPR-Korrelationen und die Quantentheorie noch nicht zu verstehen - obwohl die Korrelationen Vorhersagen ermöglichen. Nach Meinung der Autorin liegt dies an einem Missverständnis. Wie wir erwähnt haben und später noch ausführen wollen, kann mit Hilfe der Kopenhagener Deutung in Anwendung auf das EPR-Paradoxon durchaus eine qualitativ empirisch adäquate Vorhersage ohne Rechnen gelingen - im Sinne des Kriteriums K . Insofern kann ein Physiker, dem eine solche Vorhersage gelingt, begründet behaupten, er habe die Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik in Bezug auf das EPR-Experiment verstanden.

Dass Einstein, Rosen und Podolski dennoch das Gefühl hatten, die Theorie sei ihnen unverständlich, liegt dann nicht eigentlich an der Unverständlichkeit der Kopenhagener Deutung - sondern vielmehr an der Überzeugung, dass es noch eine weitere Theorie geben müsse, die mehr der von diesen Physikern als relevant gewichteten weiteren Forderungen κ_i berücksichtigt. Diese Überzeu-

gung existiert aufgrund eines persönlichen Kontextes, in dem Forderungen κ_i an eine Theorie so gewertet sein können, dass ein Verstehen einer beispielsweise akasalen oder indeterministischen Theorie trotz erfüllten Kriteriums K unbefriedigend wirkt. Diese als relevant gewichteten Forderungen äußern sich dann in Fragen an die Quantentheorie: nach den inneren Mechanismen, den kausalen Ursachen, den raumzeitlichen Verläufen, dem Zusammenhang mit anderen Theorien. Die zugrundeliegende Motivation dabei ist die Suche nach einem kohärenten Weltbild.

Wir werden im Folgenden verschiedene Interpretationen des EPR-Falles darstellen, und zwar die Kopenhagener Deutung, die Maudlinsche kausale Deutung des Kollapses und die Bohmsche kausale Deutung der Quantenmechanik. Es wird sich zeigen, dass diese Interpretationen jeweils unterschiedliche Bündelbedingungen κ_i berücksichtigen. Sollte sich im Vergleich eine der Interpretationen als besonders viele Bündelkriterien berücksichtigend herausstellen, so könnte sich diese - trotz empirischer Äquivalenz mit den anderen - als am meisten verständnisfördernd erweisen.

5.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die derzeitigen philosophischen Theorien wissenschaftlichen Erklärens dafür kritisiert, ein Kriterium für wissenschaftliches Verstehen ohne weitere Motivation zu bevorzugen. Es wurde argumentiert, dass ein solch privilegierter Status in Bezug auf wissenschaftliches Verstehen keinem der Kriterien wie Kausalität, Visualisierung, Vereinheitlichung etc. zukommt. Stattdessen wurde ein notwendiges und hinreichendes Kriterium für Verstehen K (siehe S. 70) eingeführt, wonach eine Theorie von einem Wissenschaftler in einem gegebenen Kontext verstanden wird, wenn qualitativ adäquate Vorhersagen ohne mathematische Berechnung gelingen.

Dieser Verstehensbegriff ist insofern pragmatisch, als er die wissenschaftliche Praxis (den Kontext des Forschenden) berücksichtigt: K wird erst dadurch möglich, dass eine Theorie bestimmte Bündelkriterien κ_i berücksichtigt. Deren Gewichtung für das Verstehen geschieht individuell und hängt von den Fähigkeiten eines Wissenschaftlers, aber auch von seinem historischen und so-

5 Wissenschaftliches Verstehen

ziologischen Umfeld ab. Werden einige dieser Kriterien in einer Theorie berücksichtigt und befähigen sie einen Wissenschaftler in einem gegebenen Kontext zu einer qualitativen Vorhersage, so kann man davon sprechen, dass er die Theorie versteht.

Kausalität, Visualisierbarkeit oder Vereinheitlichung erweisen sich somit nicht als notwendige Bedingungen für wissenschaftliches Verstehen, sondern als Elemente eines Bündels von Forderungen, deren Berücksichtigung im Rahmen einer Theorie dazu beiträgt, wissenschaftliches Verstehen zu ermöglichen. Je mehr Kriterien in einem Bündel enthalten sind, die auf eine Theorie zutreffen, umso verstehbarer wird diese Theorie: in dem Sinne, dass es dann für eine möglichst große Anzahl von Wissenschaftlern möglich wird, mit Hilfe der Theorie qualitative Vorhersagen zu treffen und somit K zu erfüllen.

Die Bündelkriterien spielen aber auch eine zweite wichtige Rolle: Sie motivieren Wissenschaftler, nach einer immer komplexeren Theorie zu suchen, die immer noch mehr Kriterien κ_i berücksichtigt. Das Ziel - ein kohärentes Weltbild zu schaffen - soll so zu einem größeren Anwendungsgebiet für die Theorie und zu thematisch weiter reichenden Vorhersagen führen - also auch in diesem Sinne zu einem weiterreichenden Verständnis.

Ist ein Phänomen noch nicht verstanden, so kann dies folglich zwei Ursachen haben: Entweder es existiert noch keine Theorie, die das Phänomen erklärt, oder die vorliegende Theorie berücksichtigt diejenigen Kriterien κ_i nicht, die von bestimmten Wissenschaftlern als besonders wichtig für das Verstehen gewertet werden, so dass diesen mit Hilfe der Theorie keine qualitativen Vorhersagen gelingen. Einer dritten Gruppe von Wissenschaftlern schließlich mag sich die Theorie im Sinne des Kriteriums K als verstehbar darstellen, insofern als Vorhersagen möglich sind, sie spüren jedoch jenes im Zusammenhang mit dem EPR-Paradoxon erwähnte Unbehagen - und fühlen sich motiviert, nach einer Theorie zu suchen, die mehr Kriterien κ_i beinhaltet und somit in ihrem Sinne verstehbar ist.

Wir werden im Folgenden das EPR-Paradoxon genauer analysieren und zu diesem Zweck einige wichtige Begrifflichkeiten und Zusammenhänge der Quantenmechanik betrachten. Anschließend werden drei Deutungen der Quantenmechanik erläutert und miteinander verglichen. Dabei wird sich eine Interpre-

5.4 Zusammenfassung

tation im hier vorgestellten Sinne als am meisten Verstehen fördernd herausstellen.

6 Grundlegende Begrifflichkeiten der Quantenmechanik

Bevor wir näher darauf eingehen, was das so genannte EPR (Einstein, Rosen, Podolski)-Paradoxon ist, das zum Zwecke der Exemplifizierung des von uns vorgeschlagenen Verstehensbegriffes im Zentrum dieser Arbeit stehen soll, müssen an dieser Stelle einige wichtige Größen der mathematischen Quantenmechanik definiert werden, die sonst das Verständnis der Folgekapitel erschweren. Verständlicherweise werden im Zuge der nun vorgestellten Definitionen bereits jene zuvor erwähnten Ambiguitäten der Interpretation auftauchen. Eine Größe der Form ψ kann übereinstimmend Wellenfunktion genannt werden, ohne dass sich verschiedene Interpretationen jedoch auf eine einheitliche Bedeutung dessen einigen können, was sie unter dem Begriff verstehen. In diesem Sinne sollen im Folgenden Begriffe wie ‘Wellenfunktion’ oder ‘Wahrscheinlichkeit’ eingeführt werden, ohne zunächst darüber hinaus auf verschiedene Interpretationen der Begriffe einzugehen. Wann immer dies nicht möglich ist, soll speziell auf die Uneinigkeiten hingewiesen werden. Die folgende Einführung soll kein Lehrbuch der Physik ersetzen, sondern nur eine systematische Grundlage schaffen.

6.1 Der Zustand eines Quantensystems

Unter einem ‘*System*’ versteht man in der klassischen Physik eine Menge von Materie, deren Eigenschaften durch die Angabe bestimmter Variablen eindeutig und vollständig beschrieben werden können. Ein *klassischer Zustand* eines Systems ist durch die Angabe aller Teilchenpositionen und -geschwindigkeiten zu einem bestimmten Zeitpunkt eindeutig bestimmt. Diese Größen erlauben

6 Grundlegende Begrifflichkeiten der Quantenmechanik

dann die eindeutige Vorhersage der zukünftigen Bewegung des Systems aus den Newtonschen Bewegungsgleichungen.

Unter einem *quantenmechanischen System* versteht man eine Menge von Teilchen (beispielsweise ein Elektron, ein Photon oder aber auch ein Atom, das sich aus Elektronen und Protonen zusammensetzt), deren gemeinsame Eigenschaften durch die Angabe bestimmter Variablen beschrieben werden. Dabei gilt, dass, anders als in der klassischen Mechanik, nicht alle Eigenschaften, die einen quantenmechanischen Zustand charakterisieren könnten, auch gleichzeitig gleichermaßen wohldefiniert ('scharf') vorliegen können. Das liegt daran, dass einige dieser Größen einander ausschließen und nicht gleichzeitig beliebig exakt bestimmt werden können (siehe dazu Kap. 6.5). Ein *quantenmechanischer Zustand* ist dann eine Spezifikation von allen jeweils komplementären Eigenschaften eines Quantensystems: also eine jeweilige Spezifikation aller gleichzeitig möglichen messbaren Eigenschaften. Ein solcher Zustand wird durch einen abstrakten Vektor im Hilbert-Raum¹ (siehe Kap. 6.5) repräsentiert, der die Wahrscheinlichkeitsamplituden² für alle möglichen Zustandskonfigurationen enthält. Die zeitliche Entwicklung dieses Vektors ist streng deterministisch und folgt der so genannten Schrödingergleichung.

Der eben angesprochene 'Vektor' $|a\rangle$ ist ein mathematisches Objekt, das durch eine Länge und eine Richtung charakterisiert ist (daher die Analogie mit einem Pfeil). Vektoren können addiert und mit einem Skalar (einer Zahl) multipliziert werden, was sie beispielsweise verlängert oder verkürzt. Ferner existieren Produkte zwischen Vektoren, wie beispielsweise das 'Skalarprodukt' $\langle a|b\rangle$, dessen Resultat ein Skalar (und kein Vektor) ist. Ein 'quantenmechanischer Zustand' wird als Vektor in einem hochdimensionalen Raum (dem Hilbert-Raum) dargestellt. In den *Komponenten* (Koordinaten) des Vektors befindet sich dann die Information über die Eigenschaften des Zustands. Der Zustand eines Elektrons kann also beispielsweise als Vektor dargestellt werden, in dessen Komponenten dann die Informationen über seine Energie, Impuls, Spin etc. angegeben sind.

¹Zur weiteren und genaueren Information siehe beispielsweise *Schwabl*, F.: Quantenmechanik (QM I): Eine Einführung. Springer, Berlin 2007.

²Diese geben, wenn sie quadriert werden, die Wahrscheinlichkeiten an. Siehe Kap. 6.5.

Ein ‘Vektorraum’ schließlich ist eine Menge von Vektoren, für die gilt, dass das Ergebnis der Summe jeder dieser Vektoren wieder im Vektorraum liegen muss, ebenso das Ergebnis jeder Multiplikation mit Skalaren. Man nennt diese Bedingung ‘Abgeschlossenheit unter Addition und Skalarenmultiplikation’. Ferner ist in einem Vektorraum das Skalarprodukt in bestimmter festgelegter Weise definiert (siehe dazu Kap. 6.3).

6.2 Kompositzustände und Observable

Wenn zwei physikalische Zustände interagieren, so wird ihr gemeinsamer Zustand nach der Interaktion durch das so genannte ‘*Tensorprodukt*’ beider Zustände beschrieben. Existiert der eine Zustand ($|a\rangle$) in einem Hilbertraum H_a und der zweite in einem Raum H_b , so befindet sich der neue, gemeinsame Zustand nach der Interaktion in einem Hilbertraum $H_a \otimes H_b$. Ein solcher Raum ist wieder ein Hilbertraum.

Das Entscheidende ist, dass der neue Zustand sich nicht vollständig durch die Zustände seiner Komponenten beschreiben lässt. Es gibt also Fakten über Kompositsysteme, die sich nicht als supervenient über den Fakten ihrer Teile beschreiben lassen. Nach ihrer Interaktion sagt man, dass die beiden Zustände miteinander verschränkt sind. Ob es Prozesse gibt, die diese Verschränkung aufheben, wie beispielsweise ein Messprozess, ist umstritten. Physiker wie David Bohm³ nehmen an, dass das ganze Universum seit Beginn einen großen verschränkten Zustand darstellt, dessen Unterzustände nie wirklich separiert werden können.

Die Standarddeutung in der Physik geht davon aus, dass ein Messprozess verschränkte Zustände auflöst und Zustände somit wieder individuiert. Die Messung löst im Falle des EPR-Experiments also die verschränkten Teilchen voneinander, so dass diese wieder Eigenschaften unabhängig vom raumartig entfernten Partnerteilchen besitzen. Dies wird im Folgenden noch ausführlicher diskutiert.

³Vgl. Bohm, D. und Hiley, B.: *The Undivided Universe: Ontological Interpretation of Quantum Theory*. Routledge Chapman and Hall, London/New York 1995.

6 Grundlegende Begrifflichkeiten der Quantenmechanik

Unter einer 'Observablen' ist schließlich eine 'physikalische Größe' zu verstehen, wie Ort oder Impuls. Zugleich ist eine 'Observable' aber auch ein technisch-mathematischer Begriff für die Abbildung eines Vektorraumes auf sich selbst oder auf einen anderen Vektorraum. Diese Abbildung wird durch eine Matrix, einen Zahlenkasten, beschrieben, der dann repräsentativ für die Observable steht. In der Quantenmechanik spielen Matrizen gemeinsam mit Vektoren eine wichtige Rolle. Matrizen können auf Vektoren angewendet werden, indem man sie mit Letzteren multipliziert. Durch eine solche Matrixmultiplikation wird der Vektor verändert. Beispielsweise kann er durch das Multiplizieren mit bestimmten Matrizen eine Richtungs- oder Längenänderung erfahren.

Die Observablen repräsentieren Matrizen mit besonderen mathematischen Eigenschaften. Sie sind 'hermitesch'. Eine Matrix wird dann hermitesch genannt, wenn sie unverändert bleibt, auch wenn man die Zahlen in ihrem Zahlenkasten an der von oben links nach unten rechts verlaufenden zentralen Diagonalen spiegelt und zusätzlich komplex konjugiert.⁴ Die mathematische Eigenschaft der Hermitizität führt dazu, dass die Quantenmechanik nur reelle Zahlen für mögliche Messwerte vorhersagt - und nicht beispielsweise auch komplexe Zahlen. Wir würden uns auch in der Tat wundern, wenn als Vorhersage für eine mögliche Energie eines Teilchens das Ergebnis 3 Watt $+i \times 4$ Watt auftreten könnte; Messwerte sollen reelle Zahlen sein.

6.3 Eigenvektoren und Wellenfunktion

Um den Begriff des Eigenwertes einführen zu können, muss zuerst definiert werden, wie eine Matrix und ein Vektor im Hilbertraum aufeinander wirken können. Wird eine Matrix A auf einen Vektor $|a\rangle$ angewendet, so wird der Vektor im allgemeinen verändert, er erfährt unter Umständen eine Richtungs- und/oder Längenänderung. Das bedeutet:

$$A|a\rangle = |b\rangle, \quad (6.1)$$

⁴Bei einer komplexen Konjugation wird bei komplexen Zahlen ihre imaginäre Komponente durch ihr Negatives ersetzt (mit -1 multipliziert) ($i \rightarrow -i$).

6.3 Eigenvektoren und Wellenfunktion

wobei $|b\rangle$ ein neuer Vektor ist, der $|a\rangle$ nicht unbedingt entspricht, also unter Umständen in eine andere Richtung zeigt oder eine andere Länge besitzt. In gewissen Spezialfällen jedoch führt die Multiplikation eines Vektors mit einer Matrix dazu, dass der Vektor auf der Geraden verweilt, die er durch seine anfängliche Richtung definiert hat. Er wird ausschließlich verlängert oder verkürzt - oder um 180 Grad ins Negative verlängert, was einer Richtungs-umkehr auf derselben Geraden entspricht; der Vektor zeigt jedoch nie in eine von der Geraden seiner Anfangsausrichtung abweichende Richtung. In solchen Fällen lässt sich schreiben

$$A|a\rangle = \lambda|a\rangle, \quad (6.2)$$

wobei man in diesem Fall den Vektor $|a\rangle$ *Eigenvektor* der Matrix A nennt. Die Zahl λ ist ein Eigenwert der Matrix A .

Observable - also hermitesche Matrizen - haben die Eigenschaft, nur reelle Eigenwerte, $\lambda \in R$, zu besitzen. In vielen Lehrbüchern der Quantenmechanik werden physikalische ‘Zustände’ in der Form $\psi(x)$ statt $|\psi\rangle$ geschrieben. Dies unterscheidet sich von der Vektornotation $|\psi\rangle$ nur dadurch, dass der Vektor eines Zustands $|\psi\rangle$ auf eine Ortsbasis projiziert wird $\langle x|\psi\rangle = \psi(x)$.

Da das Ergebnis eines Skalarprodukts zwischen zwei Vektoren ein Skalar ist, ist das Ergebnis der Projektion von $|\psi\rangle$ auf eine Basis $|x\rangle$ ebenfalls ein Skalar - nämlich die skalare Funktion $\psi(x)$, die die Ortsvariable als Argument besitzt. Wir erhalten also nach dem Skalarprodukt eine mehrdimensionale skalare Funktion, die die Werte entlang der x, y, z-Achsen des Vektors als Argument besitzt.

Die Sprechweise, $\psi(x)$ stelle einen Zustand dar, ist also insofern ungenau, als man hier besser von einer ‘Zustandsfunktion’ sprechen sollte. Für unsere Zwecke können beide mathematischen Schreibweisen jedoch problemlos unter dem Begriff eines ‘Zustandes’ subsumiert werden.

Wir können im Folgenden von $|\psi\rangle$ oder $\psi(x)$ sprechen und meinen jedes Mal den ‘quantenmechanischen Zustand’ - die Unterscheidung ist in dieser Arbeit nicht von Relevanz, und der Begriff der Wellenfunktion ψ kann synonym zum Begriff des quantenmechanischen Zustands $|\psi\rangle$ verwendet werden.

6.4 Bewegungsgleichung, Superposition und Messproblem

Ist ein quantenmechanischer Zustand zu einem Zeitpunkt t_1 bekannt, so kann mit Hilfe der so genannten *Schrödingergleichung*, einer deterministischen Wellengleichung, exakt der Zustand zu einem späteren Zeitpunkt t_2 vorhergesagt werden. Die Schrödingergleichung erfüllt die für Physiker in diesem Kontext wichtige Eigenschaft des Superpositionsprinzips. Betrachtet man zwei oder mehrere mögliche Zustände eines Systems, so ist auch ihre Summe wieder ein erlaubter Zustand für das System. Dies bedeutet, dass die Summe zweier Zustände sich in die Schrödingergleichung einsetzen lässt und jeder Summand sich deterministisch nach der Schrödingergleichung entwickelt, als wäre er allein und unabhängig, also separabel.

Die Schrödingergleichung macht jedoch keine Aussagen über die Ergebnisse von Messungen. In der Tat lässt sie eine Messung *eindeutiger* Messwerte von ihrer Struktur her überhaupt nicht zu. Um dennoch zu erklären, warum wir keine Superposition von möglichen Messergebnissen messen - wie sie sich in der Schrödingergleichung entwickelt -, sondern vielmehr bestimmte, zufällig auftretende wohldefinierte und eindeutige Eigenwerte vorfinden, muss in einigen Interpretationen das so genannte *Kollapspostulat* zur Quantenmechanik hinzugefügt werden.

Nach dem Kollapspostulat führt eine Messung dazu, dass die sonst vorliegende *Superposition*, die Summe aller - mit c_n gewichteten - möglichen Zustände ψ_n eines Quantensystems

$$\psi = \sum_n c_n \psi_n \quad (6.3)$$

auf einen Eigenzustand $|\psi_n\rangle$ kollabiert, der demjenigen Eigenwert n zugehörig ist, den man als Messwert bei einer Messung mit Wahrscheinlichkeit $|c_n|^2$ feststellt⁵. Dadurch wird das System reduziert - von der Summe aller Möglichkeiten zu einer einzelnen Möglichkeit $|\psi\rangle \rightarrow |\psi_n\rangle$. Dieser Kollaps ist eine un stetige⁶

⁵Das Gesetz, wonach $|\psi(x, t)|^2$ die Wahrscheinlichkeitsdichte dafür darstellt, das Quantenobjekt am Ort x zur Zeit t zu detektieren, nennt sich Bornsche Regel.

⁶mathematisch: nichtunitäre.

6.4 Bewegungsgleichung, Superposition und Messproblem

Zeitentwicklung, die nicht von der Schrödingergleichung beschrieben wird. In der Kopenhagener Deutung bedeutet dieser Kollaps keinen objektiven Ablauf von Ereignissen in der Zeit.

In welchen speziellen Eigenzustand das System kollabiert, lässt sich weder mit Hilfe der Schrödingergleichung noch mit Hilfe anderer Gleichungen vorhersagen. Für die einzelnen Eigenzustände lässt sich nur mit der Bornschen Regel eine Wahrscheinlichkeit angeben:

$$W(c_n) = |\langle \psi_n | \psi \rangle|^2, \quad (6.4)$$

wobei $|\psi_n\rangle$ der zum Eigenwert c_n gehörende Eigenvektor ist.

Das hier auftretende berühmte *'Messproblem'* besteht vor allem darin, dass niemand eine exakte Definition für eine 'Mess-Situation' oder einen Messvorgang vorgeschlagen hat. Es lässt sich durch keine quantenmechanische Gleichung beantworten, ab welcher Größe wir ein Objekt ein Messgerät nennen sollen. Auch bleibt unklar, ob schon ein einzelnes Photon als ein Messgerät gelten kann oder erst eine makroskopische Apparatur. Oder, wenn nicht die Größe darüber entscheidet, ob ein Objekt ein Messgerät ist, so bliebe zu fragen, welche physikalische Eigenschaft sonst ein Messgerät auszeichnet. Wer oder was kann eine Messung beispielsweise an einem Teilchen durchführen? Ob dies schon die Umgebung eines Teilchens bewirken kann oder erst der beobachtende menschliche Geist, darauf geben verschiedene Interpretationen der Quantenmechanik unterschiedliche Antworten.

Die meisten Interpretationen schweigen sich jedoch über die physikalische Realisation des Kollapses der Wellenfunktion aus. Nur wenige finden einen Umgang mit dem Thema und bemühen sich um ein physikalisches 'Verständnis' wie beispielsweise die später noch ausführlicher diskutierte Theorie von David Bohm oder die von uns in dieser Arbeit im folgenden kurz erwähnten Viele-Welten-Interpretation von Hugh Everett und die Kollapstheorie von Ghirardi, Rimini und Weber. David Bohm⁷ betrachtet die Wellenfunktion als ein physikalisches (wenngleich nicht messbares) Feld, auf dem Punktteilchen wie auf einer Wasseroberfläche propagieren. Die wohldefinierten Entscheidungen, defi-

⁷Bohm, D.: A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of 'Hidden' Variables. In: Physical Review 85, Nr. 2 (1952), S. 166179.

6 Grundlegende Begrifflichkeiten der Quantenmechanik

nite Messwerte, die wir im Experiment feststellen, entstehen dort nicht durch einen Kollaps, sondern durch stochastische, quantenmechanisch berechenbare Prozesse, die das auf dem Wellenfeld tanzende Partikelchen in bestimmte Zweige des Feldes ‘schubsen’ (tatsächlich spricht Bohm von einer Kraft, die das Führungsfeld ψ auf das Teilchen ausübt und die dessen Pfad verursacht). Auch die Viele-Welten-Interpretation von Hugh Everett⁸ findet einen Umgang mit dem Kollaps der Wellenfunktion bei der Messung. Hier jedoch wird der Kollaps als epistemisch gedeutet - die Superposition bleibt in diesem Bild auch nach der Messung weiterhin bestehen, nur erleben wir stets ausschließlich einen Ast davon (siehe Abschnitt 1.3.2). Andere Beobachter befinden sich in allen anderen möglichen Ästen und stellen dort die jeweiligen wohldefinierten Ergebnisse fest.

Ein weiterer Versuch, eine nicht-Schrödingersche Entwicklung von Zuständen physikalisch in die Theorie einzubeziehen, ist von Ghirardi, Rimini und Weber 1986 vorgeschlagen worden.⁹ In ihrem Modell kollabiert jede Wellenfunktion irgendwann, allerdings mit einer verschwindend kleinen Wahrscheinlichkeit. In einem großen Ensemble von Teilchen steigt jedoch die Wahrscheinlichkeit, dass es für irgendeines der Teilchen bald soweit ist, zu kollabieren. Geschieht erst so ein Kollaps, reißt er seine Umgebung mit, so dass auch die Wellenfunktionen der Umgebung kollabieren - weswegen makroskopische Objekte allein aus stochastischen Gründen schon in wohldefinierten Eigenzuständen und nicht in Superpositionen vorkommen.

Will man ein Verständnis quantenmechanischer Vorgänge erreichen, scheint es jedoch insgesamt nicht ausreichend, den Kollaps der Wellenfunktion als ‘notwendiges Postulat’ zwischen Superposition, bzw. deterministischer Entwicklungsgleichung, und gemessenem wohldefinierten Eigenzustand zu bezeichnen, denn dadurch versteht man nicht, was zwischen den Zeitpunkten vor der Messung und dem Geschehen bei der Messung geschieht und was diesem Geschehen in der Realität entspricht. Dass dem Kollaps ein physikalischer Prozess ent-

⁸Vgl. *Everett, H.*: Relative State Formulation of Quantum Mechanics. In: *Rev. Mod. Phys.* 29 (1957), S. 454-462.

⁹Vgl. *Ghirardi, G., Rimini, A. und Weber, T.*: A Model for a Unified Quantum Description of Macroscopic and Microscopic Systems. In: *Accardi, L. et al. (eds.): Quantum Probability and Applications.* Springer, Berlin 1985.

sprechen müsste, lässt sich motivieren und hat Philosophen wie Tim Maudlin¹⁰ dazu veranlasst, nach einer physikalistisch-prozessuralen Deutung des Kollapses zu suchen. Die Intuition begründet sich auf unsere Messerfahrung: Wir können sowohl die Superposition physikalisch nachweisen (durch Interferenzeffekte), als auch die eindeutigen Eigenwerte - wir stellen also die beiden Enden als physikalisch fest, und es liegt nahe, den dazwischen liegenden Prozess ebenso als physikalisch anzunehmen, vor allem, wenn man um ein Verständnis des Gesamtprozesses bemüht ist.

6.5 Hilbertraum und mathematische Unschärferelation

In den meisten Interpretationen wird angenommen, dass jeder Observablen genau ein hermitescher Operator im Hilbertraum entspricht und jedem Vektor ein spezieller Systemzustand eines Systems. Zu einer Observablen gehört ein Satz von Eigenvektoren. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass, wenn man jenen hermiteschen Operator auf sie anwendet, der Vektor nur mit einem Skalar multipliziert wird, was bedeutet, dass der Zustand (bis auf einen Faktor) unverändert bleibt. Jeder hermitesche Operator eines Hilbertraumes besitzt einen Satz von Eigenvektoren, den er aber nicht unbedingt mit anderen Operatoren teilen muss (die Vektoren *können*, *müssen* aber nicht Elemente des Eigenvektorsatzes einer anderen Observablen darstellen). Mit anderen hermiteschen Operatoren kann ein hermitescher Operator entweder alle, einige oder auch keine Eigenvektoren teilen.

Ein quantenmechanisches System nimmt ferner, so ein weiteres gebräuchliches Postulat, einen Eigenwert einer bestimmten Observablen (wie einen exakten Ort, einen genauen Impuls ...) dann und nur dann an, wenn der Zustandsvektor des Systems einem Eigenvektor der Observablen entspricht (also dem Ortsvektor oder dem Impulsvektor). Messen wir den Impuls und erhalten wir einen Messwert, so entspricht der Messwert dem Eigenwert des Impulsopera-

¹⁰Vgl. *Maudlin, T.:* Quantum Non-Locality and Relativity. Blackwell Publishing, Oxford 1994.

6 Grundlegende Begrifflichkeiten der Quantenmechanik

tors - und wir dürfen folgern, dass der Zustandsvektor des Systems durch die Messung in einen Eigenvektor des Impulsoperators übergegangen ist.

Anhand der soeben präsentierten recht theoretischen Ausführungen lässt sich die Unschärferelation der Quantenphysik bereits einmal mathematisch erfassen. Da nämlich, wie erwähnt, ein Operator A mit einem bestimmten anderen Operator B unter Umständen keinen einzigen Eigenvektor gemein hat, bedeutet das Kollabieren auf einen Eigenvektor von A bei Messung von A , dass das System sich dann nicht in einem Eigenzustand von B befinden kann, dass dann also auch kein Eigenwert der Observablen B am System vorliegen kann. Tatsächlich sind alle bis hierher aufgeführten Deutungen Teil jenes ersten Interpretationsschrittes von den mathematischen Gleichungen zur physikalischen Deutung. Bis hierher stimmen die meisten Interpretationen überein, und auf obige Definitionen können sich die meisten Physiker einigen.

6.6 Messproblem (Teil 2) und Schrödingers Katze

Wie bereits erwähnt, vermag der Formalismus der Quantenmechanik nicht, das Entstehen einzelner Messergebnisse zu erklären. Betrachten wir zur Verdeutlichung noch einmal einen Messprozess. Nehmen wir an, ein *quantenmechanisches System mit Zustand $|\psi\rangle$* fliegt auf ein *Messgerät zu, das sich im Zustand $|M\rangle$ befindet*.

Es gilt - aufgrund der Eigenschaft eines Messgerätes, den Eigenwert des quantenmechanischen Zustands des einfliegenden Systems *festzustellen* -, dass der im System $|\psi\rangle$ ab dem Augenblick der Messung wohldefiniert vorliegende Eigenwert (beispielsweise a_1) einen speziellen und diesem Eigenwert eindeutig zuordenbaren Eigenzustand $|M_1\rangle$ mit Eigenwert m_1 des Messgeräts *induziert*, nämlich eben jenen Messzustand, der den Eigenwert a_1 anzeigt.

Es gilt also nach dem durch den Messprozess induzierten Kollaps von $|\psi\rangle$ auf $|\psi(a_1)\rangle$:

$$|\psi(a_1)\rangle > |M(m_0)\rangle \rightarrow |A(a_1)\rangle > |M(m_1)\rangle, \quad (6.5)$$

beziehungsweise im Falle des Auftretens des zweiten möglichen Messwertes a_2 :

$$|A(a_2)\rangle > |M(m_0)\rangle \rightarrow |A(a_2)\rangle > |M(m_2)\rangle, \quad (6.6)$$

6.6 Messproblem (Teil 2) und Schrödingers Katze

wobei unter $|M(m_0)\rangle$ der Grundzustand des Messgerätes vor der Messung zu verstehen ist und unter $|\psi(a_i)\rangle$ der Zustand des quantenmechanischen Systems nach dem Kollaps, wobei in diesem Zustand dann bereits ein definierter Eigenwert (a_i) vorliegt, der dann im Messgerät einen entsprechenden Eigenzustand mit dem Eigenwert m_i induziert. Betrachten wir das Problem jedoch allein im Rahmen der schrödingerschen Entwicklung, so nähert sich das einfliegende Quantensystem dem Messgerät und befindet sich dabei in dem superponierten Zustand:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|\psi(a_1)\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|\psi(a_2)\rangle. \quad (6.7)$$

Nach der Wechselwirkung mit dem Messgerät müsste nach den Regeln von Kompositsystemen und unter Benutzung der Linearität des Hilbertraumes eigentlich ein Zustand der Form

$$|\psi_{gesamt}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|\psi(a_1)\rangle|M(m_0)\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|\psi(a_2)\rangle|M(m_0)\rangle \quad (6.8)$$

vorliegen. Da das Messgerät so definiert ist, dass es den Eigenwert des Quantenzustands des einfliegenden Systems widerspiegelt, ließe diese Gleichung sich schreiben als:

$$|\psi_{gesamt}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|\psi(a_1)\rangle|M(m_1)\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|\psi(a_2)\rangle|M(m_2)\rangle. \quad (6.9)$$

Einen solchen Zustand stellen wir in der Realität jedoch nicht fest. Messgeräte befinden sich nach der Messung nicht in einer Superposition aller möglichen Messergebnisse (hier m_1 und m_2), sondern zeigen nur eines der beiden Ergebnisse an.

Wenn uns eine Theorie also eine andere Vorhersage über Ergebnisse von Messungen macht als die, die wir beobachten - nämlich dass nach der Interaktion mit dem Messgerät eine Superposition vorliegen sollte, während wir jedoch nur jeweils ein wohldefiniertes Ergebnis feststellen, dann scheint etwas mit der Theorie nicht zu stimmen.

Ein berühmtes Gedankenexperiment, das die Seltsamkeit des Messprozesses deutlich macht, ist das Experiment mit Schrödingers Katze. In diesem befindet sich ein radioaktives Atom in einer Box, zusammen mit einer Pistole

6 Grundlegende Begrifflichkeiten der Quantenmechanik

und Schrödingers Katze. Verschließt man die Box, so führt man von außen keinen Messprozess durch. Ohne Messprozess aber verbleibt das radioaktive Atom in einer Überlagerung aus ‘zerfallen + nicht zerfallen’. Wäre der Mechanismus derart, dass, zerfiele das Atom, die Pistole ausgelöst würde und die Katze erschossen würde, so träfe auf die geschlossene Box die Aussage zu, dass Aufgrund des Zustands des Atoms (‘zerfallen + nicht zerfallen’) auch die Pistole in eine Überlagerung gerät (‘abgeschossen + nicht abgeschossen’) und somit für die Katze gilt, dass sie sowohl tot ist als auch lebendig (tot + lebendig). Da von der Theorie nicht definiert wird, an welcher Stelle der Messprozess stattfindet, muss sich die Superposition, laut Formalismus, auf alle verbundenen Objekte übertragen.

Dieses Problem lässt sich mit Hilfe folgender symbolischer Kette darstellen:

$$|A\rangle \rightarrow |P\rangle \rightarrow |K\rangle, \quad (6.10)$$

wobei $|A\rangle$ für den Superpositionszustand des Atoms steht, $|P\rangle$ für den der Pistole und $|K\rangle$ für den der Katze. Fände der Kollaps der Wellenfunktion des Atoms (also der Messprozess) erst im Augenblick des Öffnens der Box statt (in der sich die drei Objekte Atom, Pistole und Katze befinden), so gelangten ohne Öffnen der Box alle drei, wie oben erläutert, jeweils in Superpositionszustände all ihrer Möglichkeiten. Fände der Kollaps (der Messprozess) andererseits innerhalb der Box, also vor dem Öffnen, und beispielsweise bereits auf Quantenniveau (als ‘vor’ der Pistole) statt, so entstünde keine makroskopische Superposition:

$$|A\rangle \rightarrow \text{Messprozess} \rightarrow |P_i\rangle \rightarrow |K_i\rangle, \quad (6.11)$$

so dass Pistole und Katze nach dem Messprozess des Atoms in wohldefinierten Eigenzuständen P_i bzw. K_i (also abgeschossen *oder* nicht abgeschossen, tot *oder* lebendig) existierten. Dass der Messprozess tatsächlich mikroskopisch und darüber hinaus zufällig stattfindet, war gerade die Annahme der zuvor erwähnten Interpretation von Ghirardi, Rimini und Weber gewesen¹¹. Genauso könnte der Messprozess jedoch am Ende der obigen Kette, beispielsweise

¹¹Vgl. Ghirardi, G., Rimini, A. und Weber, T.: A Model for a Unified Quantum Description of Macroscopic and Microscopic Systems. In: Accardi, L. et al. (eds.): Quantum Probability and Applications. Springer, Berlin 1985.

im Bewusstsein des Beobachters, stattfinden (erst nach dem Öffnen der Box):

$$|A\rangle \rightarrow |P\rangle \rightarrow |K\rangle \rightarrow \text{Messprozess}, \quad (6.12)$$

was zur *Many Minds Interpretation* der Quantenmechanik führen würde¹². Dies sind nur zwei von vielen möglichen Interpretationen des Messvorgangs, die alle empirisch äquivalent sind, wodurch die Bevorzugung einer Interpretation oft als Geschmacksfrage gilt.

6.7 Fazit

Diese kurze Einführung in die technischen Fachtermini und die technischeren Grundlagen der Quantenmechanik - jener erste Schritt von mathematischer Gleichung zu physikalischer Interpretation - soll die folgende Diskussion erleichtern. Im Falle des nun diskutierten EPR-Paradoxons wird sich zeigen, wie schwierig der zweite Interpretationsschritt in der Quantenmechanik sich gestaltet. Während Physiker sich meist auf die oben angegebene Interpretation der Vektoren im Hilbertraum einigen können, herrscht Unklarheit darüber, welchen ontologischen Status die Zustände und Observablen einnehmen und durch was (bzw. wo) die Gesetze der Quantenmechanik in die klassische Welt übergehen (in der es keine Superpositionen mehr gibt).

Im EPR-Fall wird es um Zustände gehen, die miteinander interagieren und einen gemeinsamen (verschränkten) Zustand bilden. Ist dieser Zustand über eine weite Raumregion ausgedehnt, wird der Begriff individueller Objekte fragwürdig und in manchen Interpretationen das klassisch unantastbare Prinzip der Lokalität verletzt. Das EPR-Experiment beinhaltet nahezu alle quantenmechanischen Unklassizitäten (Superposition, Kollaps, Verschränkung, Messproblem ...) und gilt bis heute für viele Physiker und Philosophen als unverstanden. Im Folgenden soll das EPR-Experiment daher im Detail vorgestellt und diskutiert werden. Diese Arbeit stellt ferner drei Interpretationen des Experiments vor, die zuletzt in Bezug auf das durch sie erbrachte Verstehen bewertet werden.

¹²Siehe dazu z. B.: *Barrett, J.: The Quantum Mechanics of Minds and Worlds.* Oxford University Press, Oxford 1999.

7 Das EPR-Paradoxon

7.1 Bedeutung des EPR-Gedankenexperiments

Im Frühsommer 1935 erschien in der Zeitschrift "Physical Review" eine Veröffentlichung von Albert Einstein, Nathan Rosen und Boris Podolski, die im Titel eine Frage stellte, die bis heute ein zentrales Diskussionsthema der Quantenphysik darstellt: "Can Quantum Mechanical Description of Reality be Considered Complete?" (Kann die quantenmechanische Beschreibung der Realität als vollständig gelten?)¹ Das in dieser Veröffentlichung vorgestellte 'EPR-Problem' setzte sich Bohrs Komplementaritätsidee einer prinzipiell nur partiell wohldefinierten und messbaren Welt entgegen und forderte eine Rückkehr zur beobachterunabhängigen Naturbeschreibung und eine Abkehr vom Glauben an einen fundamentalen Wahrscheinlichkeitsbegriff, der nicht aus unserem Unwissen resultiert, sondern als Letzterklärung gelten darf. Die Autoren suchten nach einer realistischen physikalischen Theorie - in der Prozesse beispielsweise kausal erklärbar wären und Zustände separierbar, beziehungsweise Lokalität gälte: also einige der von uns eingangs als Bündelkriterien für wissenschaftliches Verstehen bezeichneten Forderungen erfüllt wären.

In ihrer Veröffentlichung präsentierten Einstein, Rosen und Podolski ein Gedankenexperiment, mit dem sie verdeutlichen wollten, dass die Quantenmechanik keine vollständige Theorie sein könne. Für die Forscher war von Beginn an klar, dass, sollte sich beispielsweise herausstellen, dass Subprozesse existierten, die die statistischen Quantenprozesse kausal erklären könnten, oder dass Informationen in Quantenzuständen vorlägen, die von der Theorie nicht erfasst würden (wie beispielsweise ein wohldefinierter Ortsparameter oder

¹Einstein, A., Podolski, B., Rosen, N.: Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? Phys. Rev. 47 (1935), S. 777-780.

7 Das EPR-Paradoxon

wohldefinierte Impulswerte etc.), die Unvollständigkeit der Theorie bewiesen wäre. Diese sagt uns nämlich nichts über verborgene Parameter - beschreibt diese also nicht.

Da die Autoren Lokalität und Realismus voraussetzten, folgte aus ihrem Gedankenexperiment tatsächlich, dass wesentliche für die Ergebnisse von Prozessen relevante Informationen (lokale Parameter) nicht durch den Formalismus der Theorie erfasst werden. Somit meinten sie gezeigt zu haben, dass der Quantenmechanik nur deswegen keine exakten Vorhersagen gelingen, weil die Theorie die tatsächlich in der Natur vorliegenden allzeit wohldefinierten Eigenschaften von Objekten nicht vollständig erfasst. Das EPR-Experiment wird jedoch bis heute kontrovers diskutiert und seine Bedeutung und die Folgen hängen, wie wir sehen werden, von der verwendeten Interpretation der Quantenmechanik ab.

7.2 Vorgeschichte: Bohrs Komplementarität

Die 'EPR'-Veröffentlichung kann auch als Antwort auf das zuvor von Niels Bohr eingeführte und damals unter Physikern verbreitete Konzept der '*Komplementarität*' gesehen werden. Danach bedeutete für Bohr der Beobachtungsprozess stets ein physikalisches Interagieren, wodurch das klassische Messgerät und das quantenmechanische Objekt in unkontrollierbarer Weise miteinander in Wechselwirkung treten und gestört werden. Da die Störung unkontrollierbar ist, konnten Bohrs Meinung nach prinzipiell nur statistische Vorhersagen über das Verhalten von Quantenobjekten getroffen werden. Andererseits beschränkt das Messverfahren auch unser Wissen über das Objekt: Durch die Störung schien hinreichend erklärt, warum nicht alle Eigenschaften eines Objekts gleichzeitig scharf messbar seien.

Ein Beispiel für solche nicht gleichzeitig scharf messbaren Größen sind Ort und Impuls eines Teilchens. Versucht man, den Ort eines Teilchens aufzulösen, muss man man über Photonen mit dem Quantenobjekt in Kontakt treten. Je exakter man den Ort auflösen möchte, umso höher muss die Frequenz des Lichtes sein: umso kürzer nämlich ist die Wellenlänge und umso feiner die Auflösung. Mit einem hochfrequenten Photon geht allerdings ein großer Impuls

7.2 Vorgeschichte: Bohrs Komplementarität

einher,² so dass das Teilchen unkontrollierbar angestoßen wird - und sein Impuls maximal unbekannt ist. Folglich sind Ort und Impuls eines Teilchens nicht gleichzeitig beliebig scharf messbar. Solche miteinander in einer ausschließenden Relation befindlichen Größen nannte Bohr *'komplementär'*. Ein weiteres Beispiel für komplementäre Größen sind Energie und Zeit oder verschiedene Spin- oder Drehimpulsbestandteile untereinander.

Neben dem Komplementaritätsprinzip war vor der Veröffentlichung von Einstein, Podolski und Rosen auch das Kollapspostulat formuliert worden, wonach die Wellenfunktion ψ , die ein Quantenobjekt beschreibt, nur dann definite und wohldefinierte Messwerte - Eigenwerte einer Observablen - annehmen konnte, wenn ein Kollaps der Superposition - der gewichteten Summe über alle Eigenwerte und Eigenvektoren - stattgefunden hatte. Demnach bedurfte es eines Messprozesses, um überhaupt von wohldefinierten Eigenschaften eines Objektes sprechen zu können. Albert Einstein und seinen Kollegen war dies ein Dorn im Auge, denn diese Deutung war eine bewusst unrealistische: keine scharf und eindeutig ausgewertete Realität ohne Beobachter. Auch der statistische Charakter der Theorie war für Einstein ein Kritikpunkt - eine a priori indeterministische Theorie mag ihm wie eine Kapitulation vorgekommen sein, ein Aufgeben vor dem wissenschaftlichen Verstehen, für das es seiner Meinung nach einer Analyse der zugrundeliegenden deterministischen Strukturen - der klassischen Theorie, die er am Fundament der Quantentheorie vermutete -, bedurfte.

In diesem theoretischen Rahmen entstand bei Einstein und seinen Kollegen die Frage, ob die Quantenmechanik tatsächlich alles beschrieb, was die Realität ausmachte, oder ob sie nur eine Oberflächentheorie darstellte, die zugrundeliegende weitere physikalische Eigenschaften nicht oder nur statistisch erfasste. Es wäre ja durchaus denkbar, so der Ansatz, dass ein Teilchen doch zu jedem Zeitpunkt einen wohldefinierten Ort und Impuls besitzt. Möglicherweise können wir diesen nur nicht messen und nicht mit unserer Theorie erfassen, wonach die Theorie unvollständig wäre.

²Für ein Photon gilt: $E = p \cdot c = h \cdot \nu$, wobei p der Impuls des Photons ist, c die Lichtgeschwindigkeit, h das Plancksche Wirkungsquantum und ν die Frequenz des Photons. Frequenz und Impuls verhalten sich also proportional zueinander.

7 Das EPR-Paradoxon

Bohrs Komplementaritätstheorie plädierte für Indeterminismus - also fundamental statistische Prozesse - und Irrealismus - eine vom Beobachter abhängige Welt; Konzepte, die Einstein, Podolski und Rosen so nicht akzeptieren wollten und in ihrer Veröffentlichung attackierten. Um zu verdeutlichen, warum ihrer Meinung nach die Quantenmechanik unvollständig sei, erschufen Sie das EPR-Experiment. Dies stellt im folgenden Sinne ein Paradoxon dar: Fügt man zur Quantenmechanik entweder Lokalität oder Realismus oder kontrafaktische Definiertheit oder Vollständigkeit hinzu, erhält man einen Widerspruch, und dies, obwohl die Quantenmechanik nicht intrinsisch inkonsistent ist. Wir werden diese Begriffe in Kapitel 8 auf Seite 119 genauer analysieren und ihre Rolle im EPR-Experiment untersuchen.

7.3 Was ist ein EPR-Experiment?

Das Einstein-Rosen-Podolski Experiment ist ein Gedankenexperiment, das auf dem quantenmechanischen Phänomen der *Verschränkung* basiert. Dabei scheinen Messungen an räumlich separierten Teilen eines Quantensystems instantan einen Einfluss aufeinander zu besitzen. Dieser Effekt wird oft auch als ‘nichtlokales Verhalten’ oder ‘action at a distance’ - Wirkung aus der Distanz heraus - bezeichnet. Wir werden jedoch sehen, dass die Erhaltung oder Verletzung der Lokalität von der verwendeten Interpretation abhängt.

Physikalisch kann das Experiment folgendermaßen verwirklicht werden: Zerfällt ein Pion (ein Teilchen, das aus einem Quark und einem Antiquark besteht³), so kann es unter anderem zwei Elektronen emittieren. Aufgrund von Impulserhaltung fliegt im Ruhesystem des Pions (in dem es den Impuls $p = 0$ besitzt) eines der Elektronen nach rechts, das andere nach links, so dass die Summe der Impulse wieder Null ergibt.

Die Spins der Elektronen erweisen sich, sobald sie gemessen werden, als stets einander entgegengesetzt. Dies lässt sich durch Spinerhaltung erklären: Da das Ausgangs-Pion Spin Null besaß, muss die Summe der Einzelimpulse der Elektronen ebenfalls Null ergeben. Wird also an einem Elektron der Spin als in

³Das Pion ist das leichteste Meson und besitzt die Struktur $q\bar{q}$, mit q entweder up- oder down-Quark, und \bar{q} anti-up bzw. anti-down.

7.3 Was ist ein EPR-Experiment?

positive x-Achsen-Richtung ausgerichtet festgestellt, so kann man mit hundert Prozent Wahrscheinlichkeit das Ergebnis am zweiten Elektron vorhersagen: Dessen Spin wird in negative x-Richtung ausgerichtet sein.

Aufgrund der Unschärferelation, die zwischen verschiedenen Spinkomponenten (in x-, y- und z-Richtung) gilt, kann jedoch nie der Spin eines Teilchens in x-Richtung zugleich mit seinem Spin in y-Richtung oder z-Richtung gemessen werden. Weiß man, dass der Spin des einen Elektrons in positive x-Richtung zeigt, so ist zugleich sein Spin in y- oder z-Richtung maximal unsharp. Dasselbe gilt für das zweite Elektron.

Hier lässt sich nun die zentrale Bedeutung des EPR-Experiments formulieren, mit dessen Hilfe Einstein, Rosen und Podolski zeigen wollten, dass die Unschärferelation nur unser beschränktes Wissen kodiert, nicht aber die faktische Natur beschreibt. Dabei stand die Tatsache im Zentrum, dass die Korrelation der Messergebnisse der Elektronen auch dann auftritt, wenn die beiden Elektronen in raumartiger Entfernung voneinander gemessen werden.

Wenn nämlich, so das Argument der Autoren, die Messung des Spins am ersten Elektron durchgeführt wird, ohne das zweite Elektron in irgend einer Weise zu 'stören', kann es - unter Annahme des lokalen Realismus - nicht wahr sein, dass das zweite Elektron seinen wohldefinierten Zustand (Spin in negative x-Richtung) erhielt, *weil* das erste Elektron gemessen wurde. Denn das zweite Teilchen ist ja nicht selbst gemessen worden, und Wirkung aus der Distanz heraus wird von den Autoren verneint. Daraus folgte für die Autoren die zentrale These, *dass das zweite Elektron seinen wohldefinierten Spin die ganze Zeit über und insbesondere auch vor der Messung bereits besessen haben muss*. Dies jedoch widerspricht dem Formalismus der Quantenmechanik, nach dem während des Fluges des Teilchens und vor der Messung eine Superposition und kein wohldefinierter Eigenwert vorliegen soll.

Doch zeigte sich im EPR-Gedankenexperiment auch noch ein weiteres Argument gegen die Vollständigkeit der Quantentheorie: Am ersten Elektron hätte der Spin in eine andere Richtung (beispielsweise entlang der y-Achse) gemessen werden können. Dadurch hätte das zweite Elektron entlang der y-Achse einen definierten Spin besessen. Da oben bereits argumentiert wurde, dass unter Annahme des lokalen Realismus die x-Komponente des Spins bereits

während des Fluges wohldefiniert gewesen sein muss, ergibt sich ein Widerspruch zur Quantenmechanik, denn diese verbietet durch die Unschärferelation das gleichzeitig wohldefinierte Vorliegen verschiedener Spinkomponenten. Dies bedeutete also, dass mehr Information am zweiten Elektron wohldefiniert vorliegt, als es nach der Quantenmechanik erlaubt wäre, und eben dies wäre ein Fall von so genannten *'versteckten Variablen'*: Parametern, die wohldefiniert am Objekt vorliegen, jedoch nicht von der Theorie erfasst werden.

7.4 Formale Darstellung

Im allgemeinsten Fall eines EPR-Experiments existiert eine Quelle, die zwei Teilchen (zum Beispiel zwei Elektronen oder zwei Photonen) emittiert. Das eine Elektron wird beispielsweise in Richtung A gesendet und das zweite in Richtung B (wobei historisch die beiden Richtungen oft mit Alice und Bob bezeichnet werden). Laut Quantenmechanik kann man das System so arrangieren, dass die beiden Elektronen nach der Emission ein so genanntes Spin-Singlett bilden (einen gemeinsamen Quantenzustand), bei dem der Gesamtspin Null ist und der Gesamtzustand folgende Form annimmt:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|+-\rangle - |-+\rangle), \quad (7.1)$$

wobei + und – hier für die beiden Einstellungen des Spins nach der Messung stehen, die beispielsweise mit 'up' und 'down' bezeichnet werden können. Ein Zustand $|-+\rangle$ würde dann bedeuten, dass beispielsweise das rechte Elektron 'down' (–) zeigt und das linke 'up' (+).

Den Gesamtzustand $|\psi\rangle$ kann man als Superposition zweier Zustände $|+-\rangle$ und $|-+\rangle$ deuten, von denen wir ersteren Zustand 1 und den anderen 2 nennen.

Da die Symbole + und – allgemein für entgegengesetzte Spineinstellungen stehen, kann beispielsweise in Zustand 1 das erste Elektron einen Spin in positive z-Richtung besitzen und das zweite Elektron in negative z-Richtung zeigen. Für Zustand 2 ist die Verteilung der Spins dann genau umgekehrt. Die beiden Elektronen haben in der Superposition zunächst keinen definierten Spin, sie

sind ‘verschränkt’ in einer Überlagerung aller oben genannten Möglichkeiten von up und down.

Der Spinfreiheitsgrad der Teilchen kann in einem zweidimensionalen Hilbertraum dargestellt werden, wobei jeder Zustand jeweils einen Vektor im Hilbertraum darstellt. Die Operatoren, die die Observable ‘Spin’ repräsentieren, sind zweidimensionale Matrizen, die mit S_x, S_y, S_z abgekürzt werden, je nach Ausrichtungs-Koordinate des Spins. Diese Spinmatritzen können durch die so genannten Pauli-Matrizen repräsentiert werden:

$$S_x = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, S_y = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, S_z = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad (7.2)$$

wobei \hbar für das Plancksche Wirkungsquantum, geteilt durch 2π , steht. Die Eigenzustände (Eigenvektoren) der Spinmatritzen (die Spins in positive oder negative z-Richtung) im Hilbertraum können geschrieben werden als:

$$|z_+\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, |z_-\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (7.3)$$

Der Hilbertraum, in dem zwei verschränkte Teilchen existieren, ist, wie wir zuvor eingeführt haben, das Tensorprodukt der Hilberträume der einzelnen Teilchen, also $\mathcal{H} \times \mathcal{H}$. Der Spin-Singlett-Zustand $|\psi\rangle$ der beiden Elektronen zusammen nimmt somit die Form an:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|z_+\rangle \times |z_-\rangle - |z_-\rangle \times |z_+\rangle). \quad (7.4)$$

Wenn am System $|\psi\rangle$ beispielsweise S_z gemessen wird (der Spin in z-Richtung), dann kollabiert - nach der Kopenhagener Deutung - das System auf einen Eigenvektor von S_z . Wenn eines der beiden Elektronen gemessen wird (beispielsweise das in A-Richtung (nach rechts) fortgeflogene), kann dort jeweils eine von zwei Möglichkeiten gemessen werden: z_+ oder z_- .

Nehmen wir an, man misst z_+ . Laut Quantenmechanik kollabiert der Gesamtzustand des Systems dann in den Zustand 1, also $|+-\rangle$ (rechts +, links -). Formal liegt dann am rechten Elektron $|z_+\rangle$ vor und am anderen $|z_-\rangle$ und der Gesamtzustand lässt sich schreiben als

$$|z_+\rangle \times |z_-\rangle = |+-\rangle. \quad (7.5)$$

7 Das EPR-Paradoxon

Wäre am ersten Elektron $|z_{-}\rangle$ gemessen worden, so hätte das System den Zustand

$$|z_{-}\rangle \times |z_{+}\rangle = |-\rangle. \quad (7.6)$$

In jedem Fall bedeutet eine Messung und Feststellung des Zustands des ersten Elektrons, dass daraufhin das zweite Elektron wohldefiniert ist.

An dieser Stelle zeigt sich, dass der lokale Realismus zumindest nicht mehr offenkundig ist und möglicherweise scheitert, denn durch eine Messung am einen Teilchen ändert sich der Zustand des möglicherweise raumartig entfernten anderen Teilchens: von $|\psi\rangle$ (Gesamtzustand) nach $|z_{+}\rangle$ bzw. $|z_{-}\rangle$. Wäre die Welt lokal, so könnte eine solche Zustandsänderung am zweiten Teilchen nicht instantan durch Messung am ersten Teilchen ‘erzeugt’ oder ‘verursacht’ werden, und gälte Separabilität, so besäße das zweite Teilchen wohldefinierte Eigenschaften unabhängig von Beobachtungen oder Messungen an entfernten oder raumartig entfernten Zuständen.

Im Laufe der Arbeit wird sich zeigen, dass der Kopenhagener Deutung eine lokale Deutung des EPR-Experiments gelingt, während Deutungen, die sich um eine physikalistische Interpretation des Kollapses bemühen, Lokalität verletzen, siehe dazu das Kapitel über die Kopenhagener Deutung (Kap. 10), über Tim Maudlins kausale Kollapsdeutung (Kap. 11) und das Kapitel über Bohms kausale Non-Kollaps-Deutung der Quantenmechanik (Kap. 12).

Eine weitere Problematik haben wir oben bereits erwähnt. Diese besteht in der Möglichkeit, dass unvereinbare Größen an Objekten gleichzeitig vorliegen können - wenn die Folgerungen des EPR-Experiments nicht an einer wesentlichen Stelle inkonsistent sein sollten. Das lässt sich folgendermaßen verstehen: Hätte man an A den Spin in x-Richtung, also S_x , gemessen, dann wäre der Singlettzustand als Superposition zweier Zustände in positive x- und negative x-Richtung darstellbar gewesen in der Form

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|x_{+}\rangle \times |x_{-}\rangle - |x_{-}\rangle \times |x_{+}\rangle). \quad (7.7)$$

Mäße man im Experiment an einem der Elektronen den Zustand $|x_{+}\rangle$, so läge am anderen $|x_{-}\rangle$ vor und der Gesamtzustand wäre

$$|x_{+}\rangle \times |x_{-}\rangle = |+\rangle. \quad (7.8)$$

Würde am ersten Elektron jedoch $|x_- \rangle$ gemessen, so hätte das System den Zustand

$$|x_- \rangle \times |x_+ \rangle = | - + \rangle. \quad (7.9)$$

Die Spins in x- und z-Richtung sind komplementäre Größen, also nicht gleichzeitig scharf messbar. Dennoch hätten aufgrund der Möglichkeit einer Messung in x- oder z-Richtung beide Komponenten am zweiten Elektron wohldefiniert vorliegen müssen - da sie sich scharf einstellen, wenn jeweils eine davon gemessen wird, und eine Verursachung durch die Messung am ersten Teilchen jedoch ausgeschlossen werden soll.

Die Tatsache, dass die Spins in x- und z-Richtung nicht gleichzeitig scharf messbar sind, zeigt sich daran, dass die Operatoren der Spinkomponenten für die x- und die z-Richtung nicht vertauschen, man sagt: nicht kommutieren. Das bedeutet, dass sie nicht dieselbe Eigenbasis besitzen, da dies nur kommutierenden Matrizen vorbehalten ist. Nur Eigenwerte in derselben Eigenbasis können als Messwerte gleichzeitig scharf vorliegen. Mathematisch schreibt sich diese Nonkommutativität als

$$[S_x, S_z] = -i\hbar S_y \neq 0, \quad (7.10)$$

woraus die Unschärfe für die Spinkomponenten folgt:

$$\langle (\Delta S_x)^2 \rangle \langle (\Delta S_z)^2 \rangle \geq \frac{1}{4} |\langle [S_x, S_z] \rangle|^2 \neq 0. \quad (7.11)$$

Um noch einmal das Paradoxon hervorzuheben: An Elektron 1 (oder an A) hätte man den Spin sowohl in x- als auch in z-Richtung messen können. Je nach Wahl des experimentellen Aufbaus an A beeinflusst man den Gesamtzustand der Wellenfunktion ψ und damit auch die möglichen Zustände, die Elektron 2 (an B) annehmen könnte.

Entsprächen diesen Zuständen reale physikalische Eigenschaften und entschiede sich der Experimentator einen Wimpernschlag vor Eintreffen von Elektron 1 in A dazu, das Experiment von einer x-Messung in eine z-Messung zu verwandeln: Woher 'wüsste' dann das entfernte Elektron in B (instantan?), in welche Richtung (x bzw. z) es sich einzustellen hat? Findet hier ein Kollaps der Wellenfunktion statt, wie die Kopenhagener Deutung es sagt? Ist dieser Kollaps rein epistemisch oder ein nichtlokaler physikalischer Prozess? Oder lag

die Information über mögliche Messzustände schon während des Fluges an Elektron 2 vor (als verborgener Parameter)?

7.5 Kurzzusammenfassung der EPR-Problematik

Im EPR-Experiment werden zwei Teilchen emittiert und anschließend unabhängig voneinander gemessen. Die gemessenen Größen (z.B. Spins) werden immer als korreliert festgestellt. Das Phänomen *raumartig entfernter korrelierter Teilchen* nennt man *‘Verschränkung’*.

Will man diese Korrelation physikalisch ‘verstehen’, kann man sie sich entweder dadurch erklären, dass die Teilchen bereits mit entgegengesetztem Spin kreiert wurden und diese Eigenschaft während des Fluges bereits mit sich trugen - als ‘verborgene Variable’. Eine andere Deutungsmöglichkeit ist diese, dass die Teilchen in irgendeiner Weise verbunden sind, so dass das entfernte Teilchen instantan erfährt, entlang welcher Achse sein Partner gemessen wird, und sich entgegengesetzt einstellen kann.

Im ersteren Fall, dass die Elektronen schon während des Fluges mit der Eigenschaft ausgestattet sind, die im Experiment festgestellt wird, würde der Formalismus der Quantenmechanik etwas auslassen: Er spricht nicht von verborgenen Parametern, die hier den Eigenschaften entsprechen. Im letzteren Fall kommt es darauf an, wie man die Korrelation verstehen möchte: Genügt einem die epistemische Kopenhagener Deutung, in der die Gesamtwellenfunktion in nicht weiter beschriebener Weise die Korrelationen erzeugt, dann ist die Quantenmechanik vollständig. Sucht man jedoch, wie beispielsweise Einstein, Rosen und Podolski, nach einer lokalen und physikalistisch-mechanistisch-kausalen Theorie, so lässt sich die Korrelation über eine weite Raumregion hinweg beispielsweise nur mit Hilfe von Signalen oder Informationsaustausch verstehen - als ‘Prozess’ in der Raumzeit: ein Prozess, den die Quantenmechanik jedoch nicht beschreibt. Auch in dieser Sichtweise wäre die Quantenmechanik somit unvollständig.

Im Originalartikel von Einstein, Podolski und Rosen wurden darüber hinaus komplementäre Messgrößen diskutiert, wie die Messung von Ort bezie-

7.6 Folgerungen von Einstein, Podolski und Rosen

hungsweise Impuls eines Quantensystems, deren gleichzeitige Wohldefiniertheit aufgrund der Unschärferelation unmöglich sein sollte. Im EPR-Fall jedoch zeigt sich, dass diese Größen am Quantenobjekt gleichzeitig vorliegen müssten - will man nicht eine kausale Verbindung mit Überlichtgeschwindigkeit annehmen oder sich mit einer rein epistemischen Theorie zufriedengeben.

7.6 Folgerungen von Einstein, Podolski und Rosen

In ihrer Veröffentlichung stellen Einstein, Podolski und Rosen zwei Behauptungen auf, von denen die eine oder die andere gelten muss:

- 1. Die QM ist unvollständig.
- 2. Zwei komplementäre Größen können nicht gleichzeitig wohldefinierte Werte annehmen.

Wäre die Quantenmechanik vollständig (Punkt 1 nicht erfüllt), so würde also Punkt 2 gelten. Denn dann könnte man tatsächlich zwei komplementäre Größen, wie beispielsweise Ort und Impuls, nicht gleichzeitig messen, und stärker noch: Sie könnten auch nicht gleichzeitig scharf definiert sein. Andernfalls wäre ihrer Meinung nach die Quantenmechanik unvollständig (Punkt 1 erfüllt), wenn andererseits (Punkt 2 nicht erfüllt) zwei komplementäre Größen gleichzeitig reale Werte annehmen können, denn dann müsste es verborgene Parameter geben, die diese Werte wohldefinierten - während der Formalismus der Quantenmechanik beispielsweise für eine Beobachtung vorhersagen könnte, dass die Größen nicht gleichzeitig scharf messbar sind.

Dass ihre Behauptung (dass 1 oder 2 stimmen muss) gilt, versuchen die Autoren zu zeigen. Dazu formulieren sie zunächst zwei Prämissen:

- In einer vollständigen Theorie muss jedes Element der physikalischen Realität eine Entsprechung finden.
- Eine physikalische Größe, deren Wert mit Sicherheit vorhersagbar ist, ohne das System, an dem sie gemessen wird, zu stören, ist ein Element der physikalischen Realität.

7 Das EPR-Paradoxon

Wären also Orts- und Impulsvariable eines Quantenobjekts zu einem bestimmten Zeitpunkt beide wohldefiniert, so wäre die quantenmechanische Beschreibung eines Systems über eine Zustandsfunktion ψ unvollständig. Dies liegt daran, dass die Zustandsfunktion nicht in einer Eigenbasis von Orts- und Impulsraum gleichzeitig dargestellt werden kann und deswegen nicht durch einen Hilbertraumvektor repräsentiert werden kann, in dem sowohl ein Eigenwert für den Ort als auch für den Impuls stehen - ein prinzipielles mathematisches Problem. Die Zustandsfunktion repräsentierte daher nicht das physikalische System.

Wie wir gesehen haben, interagieren in einem EPR-Gedankenexperiment zwei quantenmechanische Objekte und entfernen sich dann voneinander. Nach einiger Zeit wird eine Observable an Teilchen 1 gemessen. Damit ändert sich der betrachtete verschränkte Gesamtzustand so, dass nun der Ausgang einer Messung an Teilchen 2 mit Wahrscheinlichkeit 1 exakt vorhergesagt werden kann: Beide Teilchen sind - beispielsweise bei Impulsmessung - dann in einem Impulseigenzustand und es gilt Impulserhaltung.

Da die Entscheidung, ob Ort oder Impuls von Teilchen 2 wohldefiniert sein wird, unter Umständen erst kurz vor der Messung an Teilchen 1 getroffen wird (durch Einstellung des Messapparates für Teilchen 1), sollte diese Entscheidung keinen störenden Einfluss auf die Realität der Eigenschaften von Teilchen 2 haben - so die Annahme des lokalen Realismus von Einstein, Podolski und Rosen. Demnach gälte: Hätte ich an einem Elektron den Ort gemessen, so wären beide Teilchen im Ortseigenzustand gewesen - insbesondere auch das zweite Elektron, das laut Einstein, Podolski und Rosen nicht erst durch die Messung an Teilchen 1 dazu gebracht worden sein kann, da dies eine Beeinflussung über eine möglicherweise raumartige Distanz voraussetzte.

Daraus schließen Einstein, Podolski und Rosen, dass beide Größen - Ort und Impuls - gleichzeitig real sein müssen. Da aber nach der Quantenmechanik für jedes einzelne Teilchen nur jeweils eine der Größen vorhersagbar ist - und die andere gleichzeitig maximal unscharf wäre die Quantenmechanik folglich unvollständig.

Im Laufe dieses Gedankengangs haben Einstein, Podolski und Rosen jedoch zwei wichtige Annahmen gemacht, die auf Einsteins Bild von einer phy-

7.6 Folgerungen von Einstein, Podolski und Rosen

sikalischen Theorie zurückgehen: nämlich *Separabilität und Lokalität*. In ihrer Argumentation verwenden die Autoren ferner zwei relevante Konzepte: *”Elemente der physikalischen Realität”* und *”Vollständigkeit einer physikalischen Theorie”*.⁴

Bevor wir noch einmal genauer auf Lokalität und Separabilität im EPR-Fall eingehen, hier ein kurzer Blick darauf, wie die oben definierten Konzepte in das EPR-Experiment eingehen: Wenn an *A* (Teilchen 1) der Spin des Teilchens beispielsweise in *z*-Richtung gemessen wird, dann ist auch der *z*-Spin des *B*-Teilchens festgelegt. Somit ist dieser Spin in *z*-Richtung nach der Messung am zweiten (ungemessenen) Elektron ein ‘Element der physikalischen Realität’. Analoges wäre wahr, hätte an *A* eine Messung des Spins in *x*-Richtung stattgefunden. Daraus folgt für die Autoren, dass auch der Spin in *x*-Richtung an *B* ein Element der physikalischen Realität ist.

Da in der Quantenmechanik der Spin eines Teilchens in *x*- und *z*-Richtung nicht gleichzeitig wohldefiniert und ‘Element der physikalischen Realität’ sein kann, muss die Theorie folglich *unvollständig* sein. Ist die Quantenmechanik jedoch vollständig, so muss die Messung an *A* instantan die Elemente der physikalischen Realität an *B* beeinflussen. Dies würde, interpretiert man den Kollaps als physikalischen Prozess, das Prinzip der Lokalität verletzen.

⁴‘Elemente der physikalischen Realität’ werden im Originalartikel nicht explizit definiert. Es lässt sich aber erschließen, dass Folgendes gemeint ist: wenn der Wert einer physikalischen Größe mit absoluter Sicherheit vorhergesagt werden kann, und dies vor einer Messung und ohne eingreifende Störung, dann entspricht dieser Größe ein Element der physikalischen Realität. Diese Definition bezieht sich auf die Vorhersagbarkeit von Eigenschaften. Dies ist in gewissem Sinne ein strenges Kriterium, da ‘Elemente der physikalischen Realität’ beispielsweise in verborgenen Variablen-Theorien auch grundsätzlich außerhalb unserer Vorhersagbarkeit liegen dürfen. Eine ‘vollständige physikalische Theorie’ hingegen ist für die Autoren eine Theorie, die jedes Element der physikalischen Realität erfasst. In ihrer Veröffentlichung zeigten sie mit Hilfe dieser beiden Definitionen, dass die Quantenmechanik keine vollständige Theorie sein kann.

8 Wesentliche Begriffe im Überblick

8.1 Lokalität

Unter dem Prinzip der *Lokalität* verstehen Physiker seit den Erkenntnissen der Speziellen Relativitätstheorie Minkowskis, Hilberts und Einsteins¹ die Tatsache, *dass kein Vorgang* - kein physikalisches Ereignis an einem bestimmten Raumzeitpunkt - *ein anderes beeinflussen kann, wenn beide nicht unmittelbar, über physikalischen Kontakt oder Austauscheteilchen, miteinander in Kontakt treten*. Wirkung über eine Distanz hinweg (*action at a distance*) ist nach dem Prinzip der Lokalität folglich nicht möglich.

In Einsteins Spezieller Relativitätstheorie wird dieser Gedanke so formuliert, dass kein Ereignis ein anderes beeinflussen kann, wenn es mit diesem nicht durch einen Lichtstrahl verbunden werden kann. Da ein Einfluss jeglicher Form nach den Gesetzen der Relativitätstheorie nicht schneller als mit Lichtgeschwindigkeit erfolgen kann, können Punkte, die wie beispielsweise ein Zeitpunkt auf der Erde und ein Zeitpunkt auf Alpha Centauri vier Lichtjahre voneinander entfernt sind, einander nicht instantan beeinflussen. Diese Ereignisse sind, wie man sagt, 'raumartig' voneinander getrennt.

Ein Objekt wird nach dem Prinzip der Lokalität also nur von seiner unmittel-

¹Minkowski, H.: Raum und Zeit. Jahresberichte der Deutschen Mathematiker-Vereinigung 1909, S.75-88.

Hilbert, D. : Die Grundlagen der Physik. Knigliche Gesellschaft der Wissenschaften zu Gttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse, Nachrichten, 1915, S. 395-407.

Einstein, A.: Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. Annalen der Physik 49 (1916), S. 769-822.

8 Wesentliche Begriffe im Überblick

telbaren Umgebung beeinflusst. Unter Nichtlokalität versteht man dann wiederum Einflüsse zwischen raumartig getrennten Ereignissen. Das Prinzip der Lokalität verneint damit die Möglichkeit bestimmter Einflüsse oder Abhängigkeiten zwischen raumartig getrennten Teilen einer Messapparatur, was für das EPR-Experiment eine wichtige Aussage ist.

1982 bestätigten die Experimente von Alain Aspect² die Vorhersagen der Quantenmechanik, indem sie zeigten, dass auch bei raumartig entfernten Messapparaturen die Korrelationen zwischen den Photonen des EPR-Experiments exakt auftraten, selbst wenn man jegliche möglicherweise auftretenden mit maximal Lichtgeschwindigkeit propagierenden Signale unterband. Um trotz dieses Resultats das Lokalitätsprinzip aufrecht zu erhalten, wird diese perfekte Korrelation zwischen den beiden im EPR-Experiment verschränkten Teilchen in manchen Interpretationen der Quantenmechanik nicht als physikalische Interaktion gedeutet, und nicht über die Tatsache der Korrelationen hinaus beschrieben. Einige Physiker vermuten hinter der Korrelation eine nichtlokale Kausalverbindung - andere gehen von einem gemeinsamen Grund (*common cause*) als Erklärung der Korrelationen aus; letzteres ist jedoch ein Standpunkt, der jedoch zunehmend kritisiert wird, wie wir in folgenden Kapiteln sehen werden.

Es stellt sich bei Betrachtung der EPR-Korrelationen die Frage, ob dabei die Lokalitätsrandbedingungen der Speziellen Relativitätstheorie verletzt werden - oder ob wir es, wie beispielsweise David Bohm³ oder Don Howard⁴ meinen, eher mit einer Verletzung des Separabilitätsprinzips zu tun haben. Wie wir sehen werden, hängt die Antwort auf diese Fragen von der gewählten Interpretation der Quantenmechanik ab. Wir werden die Kopenhagener Deu-

²Vgl. Aspect, A., Dalibard, J. und Roger, G.: Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time - Varying Analyzers. In: Physical Review Letters 49, Nr. 25 (1982), S. 1804-1807.

³Zu der Auffassung von Bohm und Howard siehe Bohm, D. und Hiley, B.: The Undivided Universe: Ontological Interpretation of Quantum Theory. Routledge Chapman and Hall, London/New York 1995.

⁴Howard, D.: Holism, Separability and the Metaphysical Implications of the Bell Experiments. In: Cushing, J. und McMullin, E. (ed.): Philosophical Consequences of Quantum Theory: Reflections on Bell's Theorem. University of Notre Dame Press, Indiana 1989, S. 224 - 253.

8.1 Lokalität

tung betrachten, die die Korrelation rein epistemisch auffasst, überdies Tim Maudlins kausale Deutung kennenlernen, in der die Korrelation als physikalischer Prozess aufgefasst wird, und schließlich Bohms Interpretation betrachten, in der die Welt aufgrund der Nichtlokalität der Wellenfunktion fundamental nichtlokal ist.

8.2 Separabilität

Das raumzeitliche *Separabilitätsprinzip* besagt, dass *individuelle physikalische Systeme ihre Eigenschaften unabhängig von der Umgebung besitzen*. Oder anders formuliert: Die Inhalte zweier beliebiger Raumzeitregionen, zwischen denen ein nicht verschwindendes Raumzeitintervall liegt, bedeuten getrennte, einzelne physikalische Zustände - und der gemeinsame Zustand dieser beiden physikalischen Zustände ist vollständig bestimmt durch diese beiden getrennten Zustände. Nach dieser Definition läge folglich im 'gemeinsamen Zustand' zweier Subzustände keine Information vor, die nicht auch schon in den getrennten Zuständen vorhanden ist: *Das Ganze ist nicht mehr als die Summe seiner Teile*.

Das Separabilitätsprinzip wäre entweder dann verletzt, wenn raumzeitlich getrennte Systeme sich nicht durch getrennte physikalische Zustände beschreiben ließen (sondern nur durch einen gemeinsamen Zustand) - beziehungsweise, wenn der gemeinsame Zustand nicht vollständig durch die getrennten physikalischen Teilzustände beschreibbar wäre (der Gesamtzustand also nicht ohne Informationsverlust in Teilzustände zerlegbar wäre). Kann man räumlich getrennte Zustände nicht unabhängig voneinander beschreiben, so kann man beispielsweise annehmen, dass raumzeitlicher Abstand keine ausreichende Bedingung für die Individuierung von Systemen darstellt. Unter Umständen können zwei räumlich getrennte Systeme also ein gemeinsames System darstellen.

Diese Überlegungen lassen sich abgrenzen vom Lokalitätsprinzip, bei dem der Zustand eines Systems unbeeinträchtigt durch Ereignisse in Regionen des Universums, die mit der Region des Zustands nicht durch ein Signal verbunden werden können. Mit dem Lokalitätsprinzip soll 'action-at-a-distance', Wirkung aus der Distanz, ausgeschlossen werden. Bei der Formulierung des Lokalitätsprinzips werden separierte physikalische Zustände vorausgesetzt.

Dadurch entsteht die beinahe paradox anmutende Situation, dass nicht-separable lokale Theorien formulierbar sind: Dies wären Theorien, in denen über weite Raumregionen ausgedehnte (nichtseparable) Zustände nur lokal mit anderen über weite Regionen ausgedehnten (nichtseparablen) Zuständen interagieren können. Solche Theorien wären nichtklassisch, da alle klassischen

8.3 Parameter- und Ergebnisunabhängigkeit

Theorien sowohl lokal als auch separierbar sind.

Um die Ergebnisse der Quantenmechanik zu erhalten, also die Bellschen Ungleichungen zu verletzen, muss entweder Lokalität oder Separabilität oder beides aufgegeben werden. Manche Interpretationen der Quantenmechanik, wie die Kopenhagener Deutung, haben sich dafür entschieden, Lokalität beizubehalten und auf Separabilität zu verzichten - was ein Beispiel für die oben erwähnten nichtseparablen lokalen Theorien darstellt.

Einstein gehörte stets zu denen, die sowohl Lokalität als auch Separabilität erhalten wollten - und somit beide von uns zuvor unter den Bündelkriterien des Verstehens aufgeführten Forderungen an eine Theorie stellte. Für Lokalität zu plädieren bedeutete für Einstein, seiner Speziellen Relativitätstheorie treu zu bleiben, nach der keine Signale mit Überlichtgeschwindigkeit versendet werden können und Objekte nur über physikalischen Kontakt oder der Lichtgeschwindigkeit unterworfenen Botenteilchen interagieren können. Für Separabilität führte er unter anderem ins Feld, dass die Bezeichnung eines individuellen physikalischen Systems im Grunde relativ sei - wolle man von Individuen sprechen, sollte man sich also möglichst auf ein objektives Kriterium der Individuierung stützen. Dieses sah er im raumzeitlichen Separiert-Sein gegeben, eine Position, die auch von uns zuvor genutzt wurde, um den Begriff der 'Individuen' zu spezifizieren. Ob dieses jedoch das einzige objektive Kriterium sein muss, bezweifeln manche Physiker und Philosophen - ohne nach Meinung der Autorin bislang überzeugende alternative Definitionen vorgebracht zu haben.

8.3 Parameter- und Ergebnisunabhängigkeit

Unter *Parameterunabhängigkeit* versteht man, dass ein *Messergebnis* (beispielsweise im EPR-Fall die Messung eines Teilchens auf der 'rechten' Seite), *stochastisch unabhängig davon ist, welche Observable auf der anderen Seite* (am anderen, raumartig entfernten Teilchen) *gemessen wird*. Unter *Ergebnisunabhängigkeit* versteht man, dass das *Messergebnis nicht von dem am anderen Teilchen auftretenden Messergebnis abhängt*. Diese Bedingung der Ergebnisunabhängigkeit wird durch die Quantenmechanik verletzt.

8 Wesentliche Begriffe im Überblick

Wie aber 'erklärt' man die Abhängigkeit eines Messergebnisses von dem Messergebnis in einem ganz anderen, entfernten Raumzeitbereich? Manche Philosophen, wie beispielsweise Don Howard⁵, argumentieren, dass an dieser Stelle Separabilität eine wesentliche Rolle spiele. Man könne im EPR-Fall eben nicht von zwei separablen Systemen sprechen. Zusammen genommen bedeuten Parameterunabhängigkeit und Ergebnisunabhängigkeit dasselbe wie Faktorisierbarkeit: die Möglichkeit, zwei durch physikalische Zustände beschriebene Systeme als Individuen zu verstehen und in Gleichungen durch ein Produkt zu verbinden (anstatt sie nur in einem gemeinsamen Zustand, einer gemeinsamen mathematischen Funktion, ausdrücken zu können).

Betrachten wir an dieser Stelle ein *EPR-Experiment* mit zwei Systemen, A und B , die miteinander wechselwirken und dann auf eine raumartige Distanz auseinanderfliegen. Wären diese Systeme *separierbar*, so besäße jedes von ihnen einen eigenen physikalischen Zustand. Wenn ferner das *Lokalitätsprinzip* eingehalten würde, dann könnte kein physikalisches Signal, das von B ausgeht, den Zustand von A schneller als mit Lichtgeschwindigkeit beeinflussen. A wäre also zunächst unabhängig davon, was mit B geschieht.

Allerdings trifft man dann auf einen Widerspruch zu dem Formalismus der Quantenmechanik, denn dieser weist A verschiedene Wellenfunktionen ψ zu, je nachdem, welche Observable an B gemessen wird (*Parameterabhängigkeit*), und einen anderen Eigenwert, je nachdem, welches Ergebnis die Messung an B ergibt (*Ergebnisabhängigkeit*). Wenn man an dieser Stelle Vollständigkeit der Theorie annimmt, so dass also genau ein gemeinsamer Zustand, eine gemeinsame Wellenfunktion ψ das ganze System beschreibt und alles erfasst, was es zu erfassen gibt - dann muss die Quantenmechanik *unvollständig* sein. Dies entspricht Einsteins Folgerung, der an Lokalität und Separabilität festhalten wollte. Wir werden im Folgenden auf diese Argumentation noch einmal genauer eingehen.

⁵Howard, D.: Holism, Separability and the Metaphysical Implications of the Bell Experiments. S. 224-253.

8.4 Lokaler Realismus und Partikularismus

Der *lokale Realismus* geht davon aus, dass das Lokalitätsprinzip gilt und überdies alle Objekte objektive, unabhängig existierende wohldefinierte Eigenschaften unabhängig von Wechselwirkungen wie Messungen besitzen (Separabilität und Beobachterunabhängigkeit). Dies und der so genannte Partikularismus sind die Säulen der klassischen Weltsicht.

Unter Partikularismus wird in Bezug auf unsere Problemstellung verstanden, dass nichtzufällige Korrelationen nur aus zwei verschiedenen Gründen auftreten können:

- Aufgrund einer gemeinsamen Ursache
- Aufgrund einer direkten kausalen Verbindung

Überdies wird angenommen, dass relativistische Kausaltheorien eine Propagation der Kausalität mit Überlichtgeschwindigkeit ausschließen. Für Anhänger des Partikularismus stellt das EPR-Paradoxon ein Problem dar. Denn die EPR-Korrelationen müssen erklärt werden, und dies gelingt anscheinend nur über eine Verletzung des Partikularismus.

Vertreter des Holismus hingegen, wie David Bohm oder Paul Teller⁶, vertreten die Meinung, dass die EPR-Korrelation letzten Endes eine objektive Eigenschaft des korrelierten Paares ist, eine Tatsache bezüglich des Paares, ein Fakt, der in sich selbst nicht weiter zerlegbar sein muss, insbesondere nicht in nonrelationale Anteile. Ob dies letztlich eine befriedigende Erklärung darstellt oder nur eine Kapitulation bedeutet, bleibt bislang meines Erachtens weitgehend unklar.

⁶Vgl. Teller, P.: Relational Holism and Quantum Mechanics. Brit. J. Phil. Sci 37 (1986), S. 71-81.

9 Vertiefung der EPR-Problematik

9.1 Separabilität und Lokalität im EPR-Experiment

Das Prinzip der Lokalität fordert, dass kein physikalischer Prozess an einem Ort einen instantanen Effekt an einem anderen Ort verursachen kann. Dies scheint unter anderem aus der Speziellen Relativitätstheorie zu folgen, in der keine Information mit Überlichtgeschwindigkeit transferiert werden kann, ohne dadurch das Prinzip der Kausalität zu verletzen. Generell wird angenommen, dass jede Theorie, die das Kausalitätsprinzip verletzt, interne Inkonsistenzen aufzeigt.

Selbst wenn mit einer EPR-Verschränkung keine Information übertragen werden kann (da kein Ergebnis durch eine Messung ‘induziert’ werden kann), bleibt der nichtlokale Einfluss des Kollapses für alle Theorien, die sich nicht mit einer epistemischen Deutung zufrieden geben wollen, als Problem bestehen. Da Lokalität einen starken Pfeiler physikalisch klassischer Theorien darstellt, waren Einstein, Rosen und Podolski nicht bereit, dieses Prinzip aufzugeben.

Ein anderer wichtiger Pfeiler der klassischen physikalischen Intuition ist das Prinzip der Separabilität. Ohne Separabilität vorauszusetzen, hätten Einstein, Podolski und Rosen nicht von Teilchen 1 und 2 sprechen können, sondern nur von der über den Raum ausgedehnten Wellenfunktion ψ , die Teilchen 1 und 2 (t_1 und t_2) beinhaltet, beziehungsweise vom Gesamtsystem $t_1 t_2$. Sprechen sie dennoch weiterhin von einzelnen Teilchen, so nehmen sie explizit an, dass deren Eigenständigkeit und Identität auch nach der Verschränkung erhalten bleiben.

Lokalität wird den Autoren durch die Forderung garantiert, dass eine Mes-

sung an t_1 nicht verantwortlich sein darf für den Zustand t_2 . Es kann also nicht sein, dass dieser erst wohldefinierte Eigenschaften, einen wohldefinierten Zustand, durch eine Messung an t_1 erhält. Vielmehr gilt ihrer Meinung nach, dass wenn ein solch wohldefinierter Zustand an t_2 vorhersagbar ist, dieser dann nicht ‘durch die Messung an t_1 ’ induziert worden sein kann, sondern bereits zuvor bestanden haben muss. Folglich besitzt das zweite Teilchen die ganze Zeit über einen wohldefinierten Zustand, ist also separabel von Teilchen t_1 . Da die Theorie diese wohldefinierten Zustände nicht beschreibt, erscheint sie den Autoren unvollständig.

9.2 Nichtlokale Realität, Lorentzinvarianz und Feldtheorien

Einstein interessierte sich weniger dafür, ob im EPR-Experiment theoretisch Ort und Impuls gleichzeitig scharf gemessen werden konnten. Arthur Fine zitiert in seinem Buch ”The Shaky Game” eine Zeile aus einem Brief Einsteins an Schrödinger, in der Einstein äußert, es sei ihm ”Wurst’, wie es im EPR-Paradoxon um gleichzeitige Existenz komplementärer Größen an einem Quantenobjekt bestellt sei.”¹

Für Einstein war, wie in dieser Arbeit argumentiert wurde, die Frage interessanter, wie Lokalität und Separabilität mit der Frage nach der Vollständigkeit der Quantenmechanik zusammenhängen.

Darüber hinaus fiel Einstein jedoch ein weiteres Problem auf, das auftritt, wenn man dem quantenmechanischen Formalismus zusammen mit der Hypothese des Kollapses Glauben schenkt. Gewissermaßen existiert darin nicht nur eine Korrelation zwischen den Ergebnissen, sondern sogar eine unsymmetrische Abhängigkeit des einen Zustands von der *Realität* des anderen: Erst wenn durch Messung an t_1 die Reduktion des Wellenpakets (der Kollaps) stattgefunden hat, ist auch t_2 wohldefiniert und somit ‘*real*’: War t_2 zuvor undefiniert und besaß keine beobachterunabhängigen wohldefinierten Eigenschaften, so besitzt es sie erst ‘aufgrund’ der durch die Messung induzierten ‘Realität’

¹Fine, A.: The Shaky Game. The University of Chicago Press, Chicago 1986, S. 38.

9.2 Nichtlokale Realität, Lorentzinvarianz und Feldtheorien

von t_1 . Auch die Realität von t_2 hängt von t_1 ab. Wurde an t_1 ein Ortseigenzustand gemessen, so ist auch t_2 im Ortseigenzustand beziehungsweise im Impulseigenzustand, falls an t_1 der Impuls gemessen wurde - und eben dadurch erst in seinen Eigenschaften definiert und 'real'.

Nicht zuletzt soll erwähnt werden, dass eines der größten Probleme des EPR-Experiments die fehlende Lorentzinvarianz darstellte. Die Quantenmechanik, und insbesondere die nichtrelativistische Quantenmechanik, von der bislang ausschließlich die Rede ist, war als solche nie lorentzinvariant formuliert worden. Speziell hieß das, dass der Kollaps der Wellenfunktion - also das Eintreten wohldefinierter Ergebnisse im EPR-Experiment - in dieser Theorie instantan geschehen musste - und dies über eine weit ausgedehnte Raumregion hinweg.

Sollte es überhaupt verwundern, wenn ein nichtrelativistisch formulierter Formalismus relativistische Ambiguitäten aufwirft? Liegen die Probleme des EPR-Experiments möglicherweise an der a priori nichtrelativistischen Formulierung der Quantenmechanik? Wenn dies so wäre, dann böte die so genannte Quantenfeldtheorie möglicherweise eine Lösung, denn diese ist von Anfang an relativistisch formuliert. Feldtheorien sind schon von ihrer Ausgangskonstruktion manifest separierbar. Dies liegt daran, dass sie stets von einem Satz von Punkten ausgehen (einer Mannigfaltigkeit), zusammen mit einer Topologie und einer Metrik. Anschließend werden Gesetze über die Zeitentwicklung dieser mathematischen Strukturen aufgestellt. Die klassische Elektrodynamik beispielsweise geht von einem dreidimensionalen Kontinuum (R^3) aus und definiert an allen Punkten Vektoren (die elektrischen und magnetischen Vektoren), wobei sich diese Vektoren zeitlich in ihrem Verhalten den Maxwell-Gleichungen unterwerfen.

Verschiedene Feldtheorien nehmen verschiedene solcher Strukturen an. Anschließend gehen Feldtheorien davon aus, dass sie die physikalische Welt vollständig beschrieben haben. Sie sind also reduktionistisch: Die ganze Realität eines Feldes lässt sich durch seine einzelnen Teile beschreiben. Hierbei wird angenommen, dass jeder Punkt der Mannigfaltigkeit ein separates physikalisches System darstellt. Ferner wird jedem Punkt ein separater physikalischer Zustand zugeordnet (beispielsweise ein Vektor). Zuletzt wird ange-

9 Vertiefung der EPR-Problematik

nommen, dass der Gesamtzustand sich aus den Zuständen seiner Bestandteile ergibt. Auch wenn dies an dieser Stelle nicht zufriedenstellend vertieft werden kann, soll doch kurz erwähnt werden, dass die relativistische Feldtheorie (Quantenfeldtheorie QFT) zwar eine Verallgemeinerung der Quantenmechanik darstellt, die relativistisch ist - also keine Überlichtsignale verwendet -, dennoch hat auch die QFT das EPR-Experiment bislang nicht zufriedenstellend zu erklären vermocht.

In der Quantenfeldtheorie ist das Problem der Überlichtgeschwindigkeitskommunikation damit ausgeschaltet, dass alle Operatoren, die raumartig voneinander entfernt und nicht zur selben Zeit operieren, vertauschen.² Dadurch beeinflussen sie einander nicht in ihrer Statistik. Aber auch Operatoren, die nur raumartig voneinander entfernt sind - ohne Hinweis auf die Zeit der Messung, kommutieren bereits -, das heißt, dass sie 'nichts voneinander bemerken'. Dennoch taucht hier ein Problem auf. Die Messoperatoren beim EPR-Experiment können auch durchaus untereinander vertauschen -, und dennoch bleiben die Korrelationen (und möglicherweise ihre kausale Interaktion) bestehen. Die QFT macht darüber keine Aussagen.

Die Quantenfeldtheorie beschäftigt sich mit Vielteilchensystemen und liefert keine über eine epistemische Formulierung hinausreichende physikalische Deutung des EPR-Falles. Da wir jedoch das EPR-Experiment im Labor durchführen können und das Paradoxon beobachten, macht es durchaus Sinn, nach einer physikalischen Erklärung zu suchen, die sich auch im Formalismus der von uns betrachteten Quantenmechanik widerspiegeln sollte. Da die QFT keine Lösung bietet, nach der wir das EPR-Problem 'verstehen' können, bleibt die Suche nach einer Erklärung, die Verständnis bringt, relevant.

Anders als im newtonschen Fall unendlich schneller Gravitationswirkungen sprechen wir hier nicht nur über eine theoretische Möglichkeit, sondern versuchen Beobachtungsdaten zu deuten - wir sind hierbei also aktive Zeugen, dass der Kollaps der Wellenfunktion tatsächlich instantan stattzufinden scheint. Daher scheint es meiner Meinung nach jenseits der Quantenfeldtheorie durchaus gerechtfertigt, Fragen zu stellen, inwiefern innerhalb dieses Geschehens von Kausalität und Informationsübertragung gesprochen werden kann.

²Man spricht von vertauschenden Operatoren, wenn ihr Kommutator verschwindet.

9.2 Nichtlokale Realität, Lorentzinvarianz und Feldtheorien

Eine Frage, die wir bislang noch nicht gestellt haben, ist die, ob nicht doch auch Information im EPR-Experiment übertragen wird. Ist denn die Tatsache, DASS an einem Teilchen gemessen wurde, keine Information? Wir erinnern uns: Der Gesamtzustand der beiden verschränkten EPR-Teilchen ließ sich für den Fall einer geplanten Spinmessung in z-Richtung (Messung von S_z) schreiben als

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|z_+\rangle \times |z_-\rangle - |z_-\rangle \times |z_+\rangle), \quad (9.1)$$

wobei $|z_+\rangle$ beispielsweise einen Spin-up-Zustand an einem der beiden Elektronen bedeutet. Genauso hätte man an einem der Messgeräte aber auch den Spin in x-Richtung, also S_x messen können. Dann wäre der Singlettzustand als Superposition zweier Zustände in positive x- und negative x-Richtung darstellbar gewesen, in der Form

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|x_+\rangle \times |x_-\rangle - |x_-\rangle \times |x_+\rangle). \quad (9.2)$$

Wenn nun an einem der beiden Messgeräte eine Spinmessung durchgeführt wird, dann ‘kollabiert’ das Gesamtsystem auf einen Eigenvektor von S_z (also entweder auf den Zustand, indem an dem einen Teilchen up und an dem anderen down vorliegt ($|+ -\rangle$), oder auf den umgekehrten Fall ($|- +\rangle$)), wobei diese Notation folglich ausgeschrieben sich darstellen lässt als:

$$|+ -\rangle = |z_+\rangle \times |z_-\rangle. \quad (9.3)$$

Der umgekehrte Fall wiederum, bei dem am ersten Elektron $|z_-\rangle$ gemessen wird, hätte die Form:

$$|- +\rangle = |z_-\rangle \times |z_+\rangle. \quad (9.4)$$

In jedem Fall bedeutet also eine Messung und Feststellung des Zustands des ‘ersten’ Elektrons, dass daraufhin das zweite Elektron wohldefiniert ist, beziehungsweise - will man nicht von einem einzelnen Teilchen sprechen - die Wellenfunktion über den gesamten Raum hinweg nicht mehr die Form

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|z_+\rangle \times |z_-\rangle - |z_-\rangle \times |z_+\rangle) \quad (9.5)$$

besitzt, sondern beispielsweise

$$|- +\rangle = |z_-\rangle \times |z_+\rangle. \quad (9.6)$$

9 Vertiefung der EPR-Problematik

Ist die Zustandsänderung, die Teilchen zwei nach Messung des ersten Teilchens erfährt, von $|\psi\rangle$ nach $|z_+\rangle$ oder $|z_-\rangle$, also zu einem Eigenzustand des Messoperators an t_1 , ein kausal verursachter Prozess? Immerhin findet durch die Messung am raumartig entfernten t_1 eine gewisse Form der Zustandsänderung an t_2 statt. Steckt in dieser Veränderung nicht eine Information, die von t_1 an t_2 ‘gesendet’ wurde? Diese und ähnliche Fragen motivierten Einstein, Podolski und Rosen dazu, die Quantenmechanik scharf zu kritisieren. Wir werden sehen, dass sowohl Tim Maudlin als auch David Bohm diese Zustandsänderung physikalisch zu interpretieren versuchen und dabei die Zustandsänderung als physikalisch realen Prozess auffassen.

9.3 Reaktionen auf Einstein, Podolski und Rosen

Der dänische Physiker Niels Bohr antwortete im Oktober 1935 auf Einsteins, Rosens und Podolskis Arbeit mit einer Publikation, die denselben Titel trug wie diejenige der drei Autoren.³ In dieser Veröffentlichung ging es Bohr hauptsächlich um die im EPR-Papier auftauchende Annahme der Separabilität.

Er sah das Problem darin, dass es eine wesentliche Ambiguität, ”an essential ambiguity”, im EPR-Gedankenexperiment gebe. In diesem nämlich bedeutet eine Messung an System 1 keine klassische physikalische Störung am System 2, weswegen die von Einstein, Podolski und Rosen aufgestellte Bedingung - ”if, without in any way disturbing a system” - erfüllt zu sein scheint. Bohr jedoch wendete ein, dass es einen Einfluss auf die möglichen Vorhersagen gäbe, und zwar durch den Messkontext: ”[There is] an influence on the very conditions which define the possible types of predictions regarding the future behavior of the system.”⁴

Bereits die Wahl der Observablen, die man beispielsweise an System 1 messen möchte, beeinflusse, laut Bohr, den Messkontext beziehungsweise die experimentellen Vorgänge, die wiederum notwendig sind, um die komplementären klassischen Größen zu definieren, die wir dann verwenden, um die Messung an

³Bohr, N.: Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete? In: Physical Review, 48 (1935).

⁴Ebd., S. 700.

9.3 Reaktionen auf Einstein, Podolski und Rosen

System 2 zu beschreiben.

Diese typisch bohrsche Bemerkung verdient genauere Betrachtung. Wie Bohr es auch bereits vor der Veröffentlichung von Einstein, Podolski und Rosen in seiner berühmten Como-Vorlesung 1927 sagte⁵, formen seiner Meinung nach Objekt und Messapparat ein verschränktes Paar, in dem keiner der Partner eine unabhängige Realität besitzt. Daher, so Bohr, können wir nicht von einem gemessenen Wert einer Eigenschaft der einzelnen Objekte sprechen.

Um dennoch, wie Bohr sagt, ‘objektiv’ über Messungen zu sprechen, müssen wir über Eigenschaften einzelner, unabhängiger Objekte sprechen. Bohr sagte dazu 1938:⁶

The elucidation of the paradoxes of atomic physics has disclosed the fact that the *unavoidable interaction between the objects and the measuring instruments* [Kursivschreibung durch die Autorin] sets an *absolute limit* to the possibility of speaking of a behavior of atomic objects which is *independent* of the means of observation. We are here faced with an epistemological problem quite new in natural philosophy, where all description of experience has so far been based on the assumption, already inherent in ordinary conventions of language, that it is possible to distinguish sharply between the behavior of objects and the means of observation.

This assumption is not only fully justified by all everyday experience but even constitutes the *whole basis of classical physics*. [...] As soon as we are dealing, however, with phenomena like individual atomic processes which, due to their very nature, are essentially *determined by the interaction between the objects in question and the measuring instruments necessary for the definition of the experimental arrangement*, we are, therefore, forced to examine more closely the question of *what kind of knowledge* can be obtained

⁵Diese Vorlesung wurde gehalten am 16. September 1927, publiziert 1928: Bohr, N.: Das Quantenpostulat und die neuere Entwicklung der Atomistik. Naturwissenschaften, Springer, Heidelberg, Volume 16, No. 15 (1928).

⁶Bohr, N.: Natural Philosophy and Human Cultures. Nature 143 (1938).

9 Vertiefung der EPR-Problematik

concerning the objects. In this respect, we must, on the one hand, realize that the aim of every physical experiment - to gain knowledge under reproducible and communicable conditions - leaves us no choice but to *use everyday concepts*, perhaps refined by the terminology of classical physics, not only in all accounts of the construction and manipulation of the measuring instruments but also in the description of the actual experimental results. On the other hand, it is equally important to understand that just this circumstance implies that no result of an experiment concerning a phenomenon which, in principle, lies outside the range of classical physics can be interpreted as giving information about *independent properties* of the objects.

Wir müssen demnach laut Bohr so tun, als ob, anders als die Quantenmechanik es indiziert, Messobjekt und Messapparat nicht verschränkt und außerdem beschreibbar sind mit Hilfe von mesoskopischen Begriffen unserer Erfahrungswelt. Das ist genau das, was Bohr "Beschreibung mit Hilfe von klassischen Konzepten" nennt. 'Klassisch' bedeutet also, die Verschränkung zu vernachlässigen und Separabilität anzunehmen. Jedoch können wir - so Bohrs Einwand gegen Einstein, Podolski und Rosen - solche klassischen Beschreibungen nur relativ zur Angabe eines *speziellen experimentellen Kontextes* geben, in dem die Eigenschaften des Systems gemessen werden. Die klassischen Beschreibungen sind dann eben genau deswegen komplementär, weil die *Kontexte*, die für die Messungen inkompatibler Observabler notwendig wären, nicht gleichzeitig realisiert werden können.

Einstein antwortete darauf 1949:

Of the 'orthodox' quantum theoreticians whose position I know, Niels Bohrs seems to me to come nearest to doing justice to the problem. Translated into my own way of putting it, he argues as follows:

If the partial systems A and B form a total system which is described by its ψ -function $\psi(AB)$, there is no reason why any mutually

9.3 Reaktionen auf Einstein, Podolski und Rosen

independent existence (state of reality) should be ascribed to the partial systems A and B viewed separately, not even if the partial systems are spatially separated from each other at the particular time under consideration. The assertion that, in this latter case, the real situation of B could not be (directly) influenced by any measurement taken on A is, therefore, within the framework of quantum theory, unfounded and (as the paradox shows) unacceptable⁷.

Das EPR-Papier regte aber nicht nur Niels Bohr zu Antworten an. 1935 antwortete auch Erwin Schrödinger mit drei Veröffentlichungen⁸, in denen er unter anderem den Begriff der ‘Verschränkung’ einführte. In diesen teilte er die Sicht von Einstein, Rosen und Podolski bezüglich der Unvollständigkeit der Quantenmechanik.

Verschiedene Physiker haben in den Folgejahren Versuche unternommen, die Quantenmechanik zu vervollständigen. Ein prominenter Versuch verwendet die Idee, dass der Quantenmechanik eine tiefere Theorie zugrunde liegt, für die die Quantenmechanik eine Form der statistischen Approximation darstellt. Die vollständigere Theorie enthält Variablen für alle ‘Elemente der physikalischen Realität’ - eine ‘verborgene Variablen’-Theorie.

Beispielsweise könnte man sich im EPR-Fall vorstellen, dass das Elektronenpaar nach seiner Emission immer zwischen wohldefinierten und stets entgegengesetzten Spins seiner beiden Bestandteile oszilliert. An Teilchen *A* liegt also mal ein Spin-up-Zustand vor, während an *B* ein Spin-down-Zustand vorliegt, dann fluktuiert das Ergebnis und ist genau umgekehrt - und dies wild fluktuiierend, ‘hin und her’, bis eine Messung vorgenommen wird. Eine solche versteckte Variablen-Theorie wäre experimentell nicht von der Quantenmechanik zu unterscheiden, die Theorien wären empirisch äquivalent.

Allerdings steht einer solchen versteckten Variablen-Theorie eine einfluss-

⁷ *Einstein, A.*: Reply to Criticisms. In: *Schilpp, P.* (ed.): *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*. Tudor Publishing Co., London 1949, S. 681-682.

⁸ *Schrödinger, E.*: Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik. *Naturwissenschaften* 23 (1935), S. 807-812, 823-828, 844-849.

9 Vertiefung der EPR-Problematik

reiche Kritik entgegen. Diese lieferte John Bell 1964.⁹ Mit Hilfe mathematischer Ungleichungen vermochte er ein experimentell überprüfbares Kriterium aufzustellen, ob die Quantenmechanik tatsächlich, wie von Einstein gefordert, lokal sei. Seine seither berühmt gewordene Ungleichung wurde wiederholt im Experiment verletzt - womit jeweils gezeigt wurde, dass die Quantenmechanik nicht zugleich separabel und lokal sein kann - und ebenso wenig eine versteckte Variablen-Theorie existieren kann, die lokal ist. Nach Bells Ungleichung bleiben für den Realisten in der Physik nur noch zwei Auswege: eine nichtlokale Versteckte-Variablen-Theorie - oder das Verwerfen von kontrafaktischer Wertedefiniertheit, wie wir in Kapitel 14 noch ausführlicher diskutieren werden.

Die Bohmsche Quantenmechanik, wie wir später sehen werden, entscheidet sich dafür, Wertedefiniertheit beizubehalten (die Ortsvariable ist zu allen Zeiten wohldefiniert), und führt ein nichtlokales Quantenpotential ein. Die Kopenhagener Deutung hingegen behält Lokalität bei und verwirft kontrafaktische Wertedefiniertheit.

Die experimentellen Resultate sprechen bislang jedenfalls eine deutliche Sprache: Entsprechende Resultate (u.a. durch Alain Aspect) bestätigen die quantenmechanischen Vorhersagen und widerlegen den Einsteinschen lokalen Realismus. Sie zeigen eine (quantenmechanisch zulässige) Korrelation, die deutlich größer ist, als dies in einer klassischen Theorie, d.h. entsprechend der Bellschen Ungleichung, denkbar wäre.

9.4 Relativistik und widersprüchliche Realitäten

Das EPR-Experiment wirft nicht nur Fragen dazu auf, wie die Korrelation physikalisch-mechanistisch-kausal zu verstehen sein kann, sondern produziert auch unterschiedliche Realitäten, je nachdem, aus welchem Bezugssystem wir auf das Experiment blicken. Dies zeigt sich darin, dass Beobachter sich nicht einigen können, an welchem Teilchen der stochastische Messprozess stattgefunden hat und welches Teilchen in seiner daraufhin deterministisch folgenden Einstellungsrichtung gemessen wurde.

⁹Vgl. Bell, J.: On the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox. *Physics* (1964), S. 195 - 200.

9.4 Relativistik und widersprüchliche Realitäten

Das EPR-Experiment in der nichtrelativistischen Quantenmechanik ist in der Tat ein halb deterministischer, halb stochastischer Prozess. Nach der Verschränkung der Teilchen t_1 und t_2 fliegen diese auseinander. Wird an t_1 später eine Messung durchgeführt, so findet an diesem, laut Quantenmechanik, ein irreduzibel stochastischer Prozess statt, bei dem das Teilchen seine wohldefinierte Eigenschaft (beispielsweise seine Polarisation) festlegt. Aufgrund der stochastischen Entscheidung für eine wohldefinierte Polarisation ist danach jedoch das Verhalten von t_2 determiniert. Dieses Teilchen durchläuft nun einen deterministischen Prozess und wird absorbiert oder durchgelassen durch Polarisation 2, je nachdem in welchem festen Zustand es sich nun befindet.

Betrachtet man diese Situation jetzt jedoch relativistisch, so können sich, bei raumartig getrennten Messprozessen, zwei Beobachter nicht darauf einigen, an welchem Photon der deterministische und an welchem der stochastische Prozess stattgefunden hat. Noch deutlicher sieht man die Problematik, wenn an Teilchen 1 eine Ortsmessung durchgeführt wird, an Teilchen 2 jedoch eine Impulsmessung. Beobachter 1, der den Messprozess an t_1 als ‘zuerst’ einschätzt, folgert, dass Teilchen 2 folglich kurze Zeit in einem Ortseigenzustand gewesen ist, bevor es in einen Impulseigenzustand projiziert wird (bei der Impulsmessung). Beobachter 2, der die Messung an t_2 als ‘zuerst’ einstuft, nimmt an, dass t_1 aufgrund der Messung an t_2 einige Zeit im Impulseigenzustand war, bevor es in den Ortseigenzustand projiziert wurde.

Die Beobachter können sich auf keine konsistente Realität einigen. Besonders deutlich zeigt sich dies in den widersprüchlichen Protokollen der Experimentatoren. Angenommen, Beobachter 1 misst an t_1 den Ort. In seinem Ruhesystem findet seine Messung vor der Messung von Beobachter 2 an t_2 statt. Beobachter 2 misst schließlich den Impulszustand an t_2 . Beobachter 1 wird folglich nach der Messung von Teilchen 1 und Teilchen 2 aus seinem System heraus folgende Darstellung des Geschehens geben:

9 Vertiefung der EPR-Problematik

”Ich habe an t_1 den Ortszustand gemessen. Dadurch ist die Wellenfunktion auf einen Ortseigenzustand kollabiert - und somit weiß ich, dass nach den Gesetzen der Quantenmechanik t_2 in einen Ortseigenzustand kollabiert ist. t_2 hatte also für kurze Zeit einen wohldefinierten Ort, bevor Beobachter 2 das Teilchen gemessen hat und es in einen definierten Impulszustand kollabiert ist. Das heißt: t_1 Ortszustand, t_2 Ortszustand, dann: t_2 Impulszustand.”

Beobachter 2 hingegen gäbe ein dieser Darstellung inhaltlich widersprechendes Protokoll ab: ”Ich habe an t_2 den Impulszustand gemessen. Dadurch ist die Wellenfunktion auf einen Impulseigenzustand kollabiert - und somit weiß ich, dass nach den Gesetzen der Quantenmechanik auch t_1 in einen Impulseigenzustand kollabiert ist. Anschließend hat Beobachter 1 den Ortszustand gemessen, wodurch t_1 in den Ortseigenzustand kollabierte.

Das heißt: t_2 Impulszustand, t_1 Impulszustand, dann: t_1 Ortszustand.”

Beide Male ist das Endergebnis gleich: t_1 befindet sich am Ende des Experiments im Ortszustand, t_2 im Impulszustand. Uneinigkeit herrscht jedoch darüber, ob t_2 sich jemals im Ortseigenzustand befunden hat (wie Beobachter 1 es protokolliert) oder ob t_2 sich nie im Ortseigenzustand befand, sondern t_1 sich vielmehr zwischenzeitlich im Impulszustand befand (wie Beobachter 2 es zu Protokoll gibt).

Diese Uneinigkeit über Ereignisse in Abhängigkeit von der Hyperebene der Gleichzeitigkeit ähnelt Problemen, die man aus der Speziellen Relativitätstheorie kennt - und ist doch davon verschieden. In der Speziellen Relativitätstheorie gibt es beispielsweise das Problem des relativistisch schnell fahrenden Autos, das einmal ganz in einen Tunnel hineinzupassen scheint und einmal nicht. Auf diese Parallele ist Tim Maudlin¹⁰ genauer eingegangen und schlägt auch für die Quantenmechanik eine Hyperebenen-Abhängigkeit vor. Das relativistische Tunnel-Problem und eine Analyse der Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen relativistischer Nichtübereinstimmung von 'Geschichten' unterschiedlicher Beobachter mit dem EPR-Fall wird in dieser Arbeit detaillierter in Kapitel 11.9 auf Seite 176 behandelt. Ohne das oben eingeführte

¹⁰Vgl. Maudlin, T.: Quantum Non-Locality and Relativity. Blackwell Publishing, Oxford 1994.

Problem widersprüchlicher Realitäten hier schon auflösen zu können, soll doch verdeutlicht werden, dass im Herzen des hier angerissenen Problems der instantane Kollaps der Wellenfunktion in der nichtrelativistischen Quantenmechanik liegt.

9.5 Kollaps im EPR-Experiment

Im Herzen des EPR-Paradoxons liegt der Kollaps der Wellenfunktion. Nimmt man an, dass ein Kollaps der Wellenfunktion stattfinden muss, um die eindeutigen Messergebnisse zu produzieren - und wir werden später Kollaps- und Non-Kollaps-Deutungen vergleichen -, so kann im EPR-Fall eine solche nicht-schrödingersche Entwicklung auf keinen Fall vor Erreichen des Detektors einsetzen. Dies liegt daran, dass nur der quantenmechanisch korrelierte Zustand die Statistik des Experiments reproduziert.

Insofern ist es fraglich, ob beispielsweise die GRW-Theorie für die kausale Erklärung des EPR-Experiments von Nutzen ist. In dieser hatten Ghirardi, Rimini und Weber¹¹ vermutet, dass jede Wellenfunktion statistisch zu einem nicht vorhersagbaren und undeterminierten Zeitpunkt kollabiert. Im EPR-Fall wäre nicht einzusehen, warum der Kollaps genau am Detektor geschehen solle, und geschähe er davor, beispielsweise, so läge kein quantenmechanisch korrelierter Zustand am Detektor mehr vor und die Statistik wäre nicht dieselbe.

David Bohm hat deswegen angenommen, dass die Wellenfunktion nicht vollständig ist und es noch 'verborgene' Parameter gibt; dass also beispielsweise Ort und Impuls eines Quantenteilchens doch in jedem Augenblick wohldefiniert sind. Diese dadurch definierten Punktteilchen 'schwimmen' dann auf einem von ihm als physikalisch real erachteten 'Führungsfeld' ψ , das eine Quantenkraft auf das Teilchen ausübt und es somit auf unklassische Wege (wie beispielsweise beim Doppelspaltexperiment) leitet (siehe Kap. 12). Die Wellenfunktion als solche ist in diesem Modell nichtlokal. Sie 'spürt' Veränderungen der umgebenden Raumzeitpunkte 'instantan' an jedem Raumzeitpunkt

¹¹Vgl. Ghirardi, G., Rimini, A. und Weber, T.: A Model for a Unified Quantum Description of Macroscopic and Microscopic Systems. In: Accardi, L. et al. (eds.): Quantum Probability and Applications. Springer, Berlin 1985.

und passt sich diesen Änderungen an, wodurch die lokalen Pfade der Partikelchen beeinflusst werden. Bohms Theorie erweist sich im Bezug auf das EPR-Experiment als empirisch äquivalent zur Kopenhagener Deutung.¹²

9.6 EPR-Korrelationen anders als Newtons

Fernwirkung

Wie wir bereits im Kapitel über wissenschaftliches Verstehen ausgeführt haben, ging Newtons Gravitationstheorie von einer instantan übertragenen Gravitationswechselwirkung aus. Diese Tatsache war für den mechanistisch denkenden Newton bereits zu Lebzeiten ein Problem, ließ sich aber nicht anders in sein physikalisches Weltbild integrieren.

In mancher Hinsicht scheint die EPR-Korrelation zunächst eine solche instantante 'newtonsche' Fernwirkung darzustellen. In vielerlei Weise ist diese Korrelation dann jedoch auch wieder anders als die Newtonsche instantante Gravitationswirkung, und zwar insofern, als die Newtonsche Gravitationskraft mit dem Quadrat des Radius abfällt - während die EPR-Korrelation immer gleich stark bleibt. Gleichgültig, wie weit die beiden Teilchen voneinander entfernt sind, beeinflussen sie sich immer gleich, insofern als ihre Korrelation erhalten bleibt.

Ferner ist die EPR-Korrelation exklusiv. Anders als bei der Gravitation, die alle Masseobjekte gleichermaßen beeinflusst, ist die EPR-Korrelation ein Band zwischen zwei oder mehreren ausgewählten Objekten, die in der Vergangenheit miteinander interagiert haben - somit hängt die EPR-Korrelation von der Vergangenheit ab.

Nicht zuletzt scheint die EPR-Korrelation die Lichtgeschwindigkeitsgrenze nicht einzuhalten. Alain Aspect hat mit seinen Experimenten gezeigt, dass eine tatsächlich fundamental stochastische Wahl der Winkelstellung des Polarisators auf einer Seite Sekundenbruchteile vor der Messung immer noch zu perfekten Korrelationen führt - Teilchen 1 kann in diesem Zeitschlitz zwischen

¹²Siehe auch: *Holland, P.: A Quantum Theory of Motion. Cambridge University Press, Cambridge 1995.*

Polarisationswinkelentscheidung und Messung nicht innerhalb der Grenzen der Lichtgeschwindigkeit eine ‘Botschaft’ an Teilchen 2 geschickt haben, damit dies sich in einem Winkel einstellt, der unter der Korrelation erwartet wird. Die Geschwindigkeit dieser Quantenkommunikation scheint mit einer relativistischen Raumzeitstruktur unvereinbar.

Aspects Experimente schließen auch aus, dass ein gemeinsamer kausaler Grund im Vergangenheitslichtkegel von Teilchen 2 für dessen Polarisation verantwortlich gemacht werden kann. Gäbe es einen gemeinsamen Grund, so müsste von dort aus mit maximal Lichtgeschwindigkeit ein Signal an beide Teilchen gesendet werden, so dass sie sich im Falle einer Messung korreliert verhalten. Bei Aspects Experiment jedoch wird die Einstellung des Messgerätes unmittelbar vor der Messung, beispielsweise von Teilchen 1, geändert. ‘Unmittelbar’ bedeutet hier, dass es in einer so kleinen Zeit per Zufallsgenerator geschieht, dass von diesem Messgerät kein Signal an das raumartig entfernte Teilchen 2 gesendet werden kann. Außerdem ist auch die Möglichkeit einer ‘backwards-causation’ von Detektor 1 zu einem common cause ausgeschlossen. Da die beiden Teilchen auch raumartig voneinander getrennt sein können oder die Entscheidung für die Art der Messung an Teilchen 1 so kurz vor der Messung gefällt werden kann, dass Kommunikation im Rahmen der Lichtgeschwindigkeit unmöglich ist, hängt das Resultat für Teilchen 2 von einem raumartig entfernten Ereignis ab.

9.7 Ausblick

Das EPR-Experiment erweist sich als ein Problem, sowohl für die klassische Weltansicht als auch für die kohärente physikalische, beispielsweise relativistische Beschreibung. Dadurch, dass raumartig entfernte Messergebnisse perfekt korreliert sind, entsteht die Frage, wie eine solche Korrelation physikalisch verwirklicht sein kann, ohne die Grenze der Lichtgeschwindigkeit zu verletzen.

Letztlich unabhängig vom Status der Wellenfunktion - als epistemische Beschreibung oder physikalischer Prozess - sagt uns der quantenmechanische Formalismus, dass wenn die Polarisatoren des EPR-Experiments ausgerichtet sind, die kontrafaktische Aussage gilt: Hätte das Photon sich auf einer Seite,

9 Vertiefung der EPR-Problematik

am einen Polarisator, anders verhalten, so hätte sich auch das zweite Photon anders verhalten. Diese kontrafaktische Abhängigkeit scheint eine Kausalverbindung zwischen den Photonen zu implizieren. Andererseits versuchen physikalische Theorien, das Postulieren von Überlichtverbindungen zwischen physikalischen Objekten zu vermeiden.

In der orthodoxen Quantenmechanik kann über eine EPR-Korrelation keine Information ausgetauscht werden. Zumindest kann also an keinem der Teilchen ein bestimmtes Ergebnis durch den Messprozess induziert werden. Wäre dies möglich, so könnte der weit entfernte Beobachter möglicherweise mit Überlichtgeschwindigkeit eine bewusste Entscheidung für ein Messergebnis - eine Information - erhalten.

Bislang gelingt es keiner lokalen deterministischen (also möglichst klassischen) Theorie, die experimentelle Situation angemessen zu beschreiben. Wir verstehen nicht, was zwischen den beiden Enden des Experimentes vorgeht und können die Korrelation nicht über eine epistemische Deutung hinaus erklären. Die meisten Physiker heute meinen, dass die Theorie der Quantenmechanik vollständig ist und das EPR-Paradoxon nur unseren klassischen Intuitionen zuwider steht.

In der Kopenhagener Deutung geht man von einem instantanen Kollaps der Wellenfunktion aus, der nur epistemisch ist und daher keine Probleme mit der Relativitätstheorie verursacht. Wie die Kopenhagener Deutung aufgebaut ist und was Einstein, Rosen, Podolski und viele andere motivierte, eine über sie hinausreichende Interpretation zu suchen, beziehungsweise welche Probleme mit physikalistischen Deutungen des Kollapses einhergehen, soll in den nun folgenden Kapiteln analysiert werden.

10 Kopenhagener Deutung: Die epistemische Kollapstheorie

Das EPR-Experiment wirft viele Fragen auf und kaum jemand würde behaupten, wirklich zu verstehen, was physikalisch vor sich geht. Zwar existieren epistemische Deutungen, doch behalten wir dabei den Eindruck, nur zu beschreiben und den Vorgang nicht zu verstehen.

Die Frage ist, ob eine der quantenmechanischen Interpretationen uns mehr Verständnis liefern kann - uns den EPR-Fall besser verstehen lässt, als andere. Dazu werden wir im Folgenden zunächst die minimalistische Kopenhagener Deutung betrachten (die in ihrem Minimalismus zugleich auch vereinheitlichend ist, insofern als eine minimale Menge fundamentaler Prinzipien angenommen wird und möglichst keine Zusatzannahmen). Da sie eine Kollapstheorie darstellt, werden wir ihr im Anschluss ein weiteres Kollapsmodell gegenüberstellen: nämlich den Versuch einer kausal-mechanistischen Deutung des EPR-Experiments durch Tim Maudlin. Daran anschließend soll die Bohmsche Deutung als Beispiel einer Non-Kollaps-Theorie vorgestellt werden.

10.1 Die Ursprünge der Deutung

Die Kopenhagener Deutung war historisch die erste anerkannte Interpretation der Quantenmechanik - der erste Versuch, zu verstehen, was auf der Ebene der Atome vor sich geht und den mathematischen Formalismus physikalisch zu deuten. Niels Bohr gilt weithin als der Begründer der Kopenhagener Interpretation der Quantenmechanik, ebenso haben aber Werner Heisenberg, Max Born, Erwin Schrödinger und andere dazu beigetragen.

10 Kopenhagener Deutung: Die epistemische Kollapstheorie

Tatsächlich war es bis zur Formulierung der Kopenhagener Deutung unmöglich gewesen, die von Niels Bohr¹ zur Erklärung der beobachteten Spektrallinien von Atomen vorgeschlagenen quantenmechanischen Gesetze überhaupt zu interpretieren. Einem Elektron im Orbital eines Atoms waren in Bohrs Theorie nicht mehr alle Orte zugänglich. Orte zwischen den ‘Umlaufbahnen’ waren prinzipiell unerreichbar. Diese Tatsache ließ sich nicht mit Hilfe klassischer Prinzipien (wie beispielsweise dem Prinzip der stetigen Bewegungen) erklären, sondern bedurfte des Konzepts der ‘Quantensprünge’.

Die Quantenwelt war zu dieser Zeit auch im Sinne des von uns formulierten hinreichenden und notwendigen Kriteriums K insofern ‘unverstanden’, als Vorhersagen bestimmter Vorgänge sich als prinzipiell unmöglich darstellten: So konnte beispielsweise die exakte Zerfallszeit eines radioaktiven Atoms prinzipiell nicht vorhergesagt werden. Der Grund lag darin, so die Deutung, dass es keine Letztbegründung, keine Kausaltheorie des Atomzerfalls gäbe. Auch ließ sich beispielsweise nicht verstehen (und nicht vorhersagen), in welche Richtung ein durch Übergang zwischen Elektronenniveaus emittiertes Photon ausgestrahlt würde.

Unzufrieden mit diesen von ihm als Schwächen empfundenen Eigenschaften der Theorie, stellte Werner Heisenberg² im September 1925 seine Matrizenmechanik und Erwin Schrödinger³ wenig später seine Wellenmechanik auf. Letztere war der Versuch, mit Hilfe einer Differentialgleichung zweiter Ordnung, wie sie oft in der klassischen Physik auftaucht, die Quantenmechanik so klassisch wie möglich zu interpretieren. Max Born⁴ ließ auf diese Ansätze schließlich seine statistische Interpretation folgen, in der das Absolutquadrat der in der Schrödingergleichung auftauchenden Funktion für eine Wahrscheinlichkeitsdichte für ein Messergebnis stand - darüber ließen sich Häufigkeiten von Messergebnissen vorhersagen.

¹Vgl. Bohr, N.: Atomic Structure. In: Nature. 106 (1921), S. 104-107.

²Vgl. Heisenberg, W.: Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen. Zeitschrift für Physik 33 (1925), S. 879-893.

³Vgl. Schrödinger, E.: Quantisierung als Eigenwertproblem I. Annalen der Physik 79 (1926), S. 361-376.

⁴Vgl. Born, M.: Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge. In: Zeitschrift für Physik 37, Nr. 12 (1926), S. 863-867.

10.2 Korrespondenzprinzip und Komplementarität

Niels Bohr vertrat ab 1927 jedoch aus Überzeugung die Kopenhagener Deutung. Für ihn war die Quantenmechanik letzten Endes eine klassische Theorie - die einige klassische Prinzipien verletzte. Dazu gehörte beispielsweise das Prinzip, dass man einzelne Objekte als individuelle Objekte bezeichnen kann, und somit mehrere Objekte als integrale Entitäten abzählen kann - dieses musste aufgrund empirischer Nichtadäquatheit verworfen werden.⁵ Aber auch die 'klassischen' Prinzipien der Kausalität und des Determinismus mussten verworfen werden, sowie das Kontinuitätsprinzip (Prinzip der Stetigkeit), wonach Objekte zwischen einem Anfangs- und Endzustand alle Zustände dazwischen durchlaufen müssen.

Auch das sonst in der Physik unantastbare Prinzip der Energieerhaltung wurde aufgegeben - insgesamt also viele der von uns als Bündelkriterien κ_i bezeichneten Forderungen an eine verstehbare Theorie. Nicht zuletzt musste schließlich auch das Prinzip aufgegeben werden, dass Zustände objektiv wohldefinierte Eigenschaften besitzen, die nicht vom Beobachter oder vom Messapparat abhängen.

10.2 Korrespondenzprinzip und Komplementarität

Ein wesentlicher Bestandteil der Bohrschen Kopenhagener Deutung ist das so genannte *Korrespondenzprinzip*. Darin fordert Bohr, dass für hohe Quantenzahlen (also beispielsweise hohe Energien) und dort, wo das Plancksche Wirkungsquantum vernachlässigbar klein wird, die quantenmechanischen Ergebnisse in die klassischen übergehen sollen. Das Korrespondenzprinzip wurde allerdings spätestens dann problematisch, als Wolfgang Pauli⁶ das Konzept des 'Spins' in die Quantenmechanik einführte. Dieser halbzahlige (innere) Drehimpuls besaß nämlich kein klassisches Pendant, in das er im Limes großer Quantenzahlen hätte übergehen können.

Dem Korrespondenzprinzip zugrunde liegt auch die von Bohr vertretene

⁵Es zeigt sich, dass die für die Quantenmechanik relevante Statistik nur dann empirisch adäquat ist, wenn Teilchen identisch - also fundamental ununterscheidbar - sind.

⁶Vgl. *Pauli, W.*: Über das Wasserstoffspektrum vom Standpunkt der neuen Quantenmechanik. *Zeitschrift für Physik* 36 (1926), S. 336-363.

10 Kopenhagener Deutung: Die epistemische Kollapstheorie

Annahme, dass wir klassische Konzepte benötigen, um die physikalische Realität zu verstehen. Bohr ging davon aus, dass wir Phänomene nur verstehen können, wenn klassische und Quantenphysik mit denselben klassischen Konzepten beschrieben werden. Seine Position lässt sich mit der in dieser Arbeit vertretenen Position insofern vereinen, als auch hier klassische Konzepte (wie Stetigkeit und der Individuenbegriff beispielsweise) unter den Bündelkriterien wissenschaftlichen Verstehens auftauchen. Allerdings konnten wir argumentieren, dass keines dieser Kriterien notwendig oder hinreichend für wissenschaftliches Verstehen ist, so dass Bohrs Position sich in ihrer Radikalität nicht von unserer Position gestützt finden kann.

Um seine These zu untermauern, schrieb Bohr in "Atomic Theory and the Description of Nature":

The necessity of making an extensive use of the classical concepts, upon which depends ultimately the interpretation of all experience, gave rise to the formulation of the so-called correspondence principle which expresses our endeavours to utilize all the classical concepts by giving them a suitable quantum-theoretical re-interpretation [...]⁷

Die Bedeutung der klassischen Konzepte wurde also, nach Bohr, in der Quantenmechanik nicht verändert, sondern nur ihre Anwendung eingeschränkt. Bohr verdeutlichte seine Sicht an mehreren bekannt gewordenen Beispielen. So könne man ein Atom 'kinematisch' oder 'dynamisch' beschreiben - 'raumzeitliche' Beschreibungen seien also komplementär zu 'kausalen' Beschreibungen (Erhaltung von Energie und Impuls): komplementär, weil sie einander ausschließenden Experimenten zuzuweisen sind (Ort und Impuls sind nicht gleichzeitig scharf messbar).

Ein weiteres Beispiel für komplementäre Beschreibungen ist die Darstellung eines Atoms als Welle oder Teilchen. Letzteres Beispiel verwarf Bohr jedoch später als Beispiel für Komplementarität, denn während Ort und Impuls nicht

⁷Bohr, N.: Atomic Theory and the Description of Nature. Nature 133 (1934), S. 962-964.

gleichzeitig in einem Experiment auftreten, manifestieren sich Welle- und Teilcheneigenschaften beim Doppelspaltexperiment gleichzeitig - was dann nicht mehr Bohrs Definition von Komplementarität entspricht. Wie jedoch zwei Sets komplementärer Sichten oder überhaupt komplementäre Beschreibungen untereinander zusammenhängen, darüber hat, wie beispielsweise auch Murdoch 1987⁸ schreibt, Bohr sich nicht geäußert.

10.3 Messkontext und klassische Konzepte

Nach Erscheinen der EPR-Veröffentlichung änderte Bohr seine Sicht auf die Interpretation der Quantenmechanik und formulierte seinen Standpunkt deutlicher. Jan Faye schreibt, dass Bohr hiernach einen neuen Schwerpunkt auf das Durchführen von Experimenten legte, um eine Theorie zu interpretieren:

[A]fter the EPR paper Bohr spoke about Heisenberg's 'indeterminacy relation' as indicating the ontological consequences of his claim that kinematic and dynamic variables are ill-defined unless they refer to an experimental outcome. Earlier he had often called it Heisenberg's 'uncertainty relation', as if it were a question of a merely epistemological limitation. [...] Bohr no longer mentioned descriptions as being complementary, but rather *phenomena* or information.⁹

In solchen Experimenten wird eine bestimmte vor-wissenschaftliche Beschreibung vorausgesetzt, die einen experimentellen Aufbau erst ermöglicht. Diese vor-wissenschaftliche Praxis unsere Umgebung zu verstehen sei eine Anpassung an die sinnliche Erfahrung von Separation, Orientation, Identifikation und Wiederidentifikation physikalischer Objekte über ein Zeitintervall. Sie

⁸Vgl. Murdoch, D.: Niels Bohr's Philosophy of Physics. Cambridge University Press, Cambridge 1987.

⁹Faye, J.: Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics. Stanford Library of Philosophy, first published Fri May 3, 2002, substantive revision Thu Jan 24, 2008.

Kursivschreibung durch die Autorin.

10 Kopenhagener Deutung: Die epistemische Kollapstheorie

beeinflusse die Wissenschaft durch Kategorien wie die Positionen oder Positionsänderungen von Dingen, die Begriffe wie Dauer oder Veränderung von Dauer, Grund und Ursache - Terme, die Teil unserer Alltagssprache sind.

Für Bohr war es wichtig, dass alle physikalischen Beschreibungen objektiv seien - eine *beobachterabhängige* Realität kam für ihn nicht in Frage. Die *Alltagskategorien*, wie oben beschrieben, spielten für ihn in der objektiven Beschreibung eine wichtige Rolle. Tatsächlich, so Bohr, benötige man obige Alltagskategorien um eine objektive Beschreibung überhaupt erst zu ermöglichen. Die *Konzepte der klassischen Physik* spielten dabei die Rolle exakt formulierter Alltagskonzepte.

Somit seien klassische Konzepte in jeder physikalischen Beschreibung notwendig, um zu verstehen, was wir tun und unsere Ergebnisse anderen mitzuteilen. Wie wir oben festgestellt haben, stellt diese Position eine Radikalisierung des von uns vorgestellten Verstehensbegriffes dar, die wir insofern nicht unterstützen, als sich klassische Konzepte nicht als hinreichend oder notwendig für Verstehen ergeben hatten.

Bohr gab zu, dass sich die Quantenmechanik wohl nie vollständig klassisch würde formulieren lassen. Plancks Entdeckung der quantisierten Energie zwingt uns dazu, die Fundamente der klassischen Physik insoweit zu modifizieren, als klassische Konzepte nicht alle zur gleichen Zeit angewendet werden könnten. Ihre gleichzeitige Verwendung sei erst im klassischen Limes möglich.

Wo jedoch das Wirkungsquantum eine signifikante Rolle spiele, bezeichne ein klassisches Konzept keine unabhängigen Eigenschaften des Objektes - außerhalb einer spezifischen Interaktion sei die Zuschreibung kinematischer oder dynamischer Eigenschaften nicht wohldefiniert. Bohr war überdies der Meinung, dass sich die quantenmechanische Beschreibung eines Objektes von der klassischen Beschreibung des 'Messapparats' unterscheide, dass also zwischen beiden eine strenge Trennlinie verlaufe - wo diese allerdings zu ziehen wäre, hat Bohr nicht streng definiert, so dass manchmal Teile der Messapparatur als zum mikroskopischen Objekt gehörend interpretiert werden konnten.

Eine anschauliche Erklärung des Formalismus der Quantenmechanik könne es nicht geben, so Bohr, denn wenn auch Schrödinger gehofft habe, die Wellenfunktion physikalisch zu verstehen, so tauche doch in der Differenzialgleichung

10.3 Messkontext und klassische Konzepte

zweiter Ordnung ein Faktor i , eine imaginäre Größe auf, wodurch die Gleichung nicht mehr realistisch zu interpretieren sei. Dennoch könne der Formalismus Vorhersagen für Ergebnisse von Messungen machen, wodurch die Theorie im von uns entlang des Kriteriums K geforderten Sinne verstehbar wäre (siehe Kap. 5).

Dieser so genannten ‘Kopenhagener Deutung’ zugrunde liegt Bohrs realistische Interpretation der Physik. Atome existierten für ihn als reale Entitäten und waren mehr als rein logische Konstruktionen. Allerdings scheint er nicht im selben Sinne an die Realität des Formalismus geglaubt zu haben - in dem Sinne, dass er uns eine wortwörtliche Beschreibung der Realität liefern könnte. So schrieb auch Folse¹⁰ 1986, dass Bohr ein Entitätenrealist sei, der aber den Theorienrealismus ablehne.

Insgesamt wurde für Bohr zunehmend klar, dass die klassische Physik eine Idealisierung sein könnte, insofern als sie annimmt, dass klassische Konzepte den Objekten auch ohne konkrete Interaktion zuzuordnen sind. Die Quantenmechanik und die Relativitätstheorie zeigten nun jedoch, dass klassische Konzepte den Objekten nur im Zusammenhang mit experimentellen Ergebnissen zuzuordnen seien. Klassische Konzepte bezeichneten für Bohr also nicht länger Eigenschaften einer physikalischen Welt hinter den Phänomenen, sondern hingen vom Beobachtungskontext ab.

Bohr stellte daraufhin die so genannte *Undefinierbarkeitsthese* auf¹¹. Demnach hängen Wahrheitsbedingungen von Sätzen, die eine kinematische oder dynamische Variable einem atomaren Objekt zuordnen, vom involvierten Apparat ab, der das Objekt misst. Die Wahrheitsbedingungen müssen also Bezug nehmen auf den experimentellen Aufbau und das Ergebnis des Experiments.

Den Kollaps der Wellenfunktion lehnte Bohr in diesem Zusammenhang als Konzept ab. Diesem Konzept ginge die Annahme voraus, die Wellenfunktion besitze eine anschauliche Bedeutung, was er verneinte.

¹⁰Vgl. Folse, H.: Niels Bohr, Complementarity, and Realism. In: Fine, A. und Machamer, P. (eds.): Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association, vol. I, East Lansing: PSA (1986), S. 96-104.

¹¹Siehe z. B.: Murdoch, D.: Niels Bohr's Philosophy of Physics. Cambridge University Press, Cambridge 1987.

10.4 Kopenhagener Deutung des EPR-Experiments

Wie wir gesehen haben, motivierte das EPR-Experiment Bohr, seine Position zu verschärfen. So schrieb er¹², dass man die dynamischen und kinematischen Eigenschaften eines verbundenen Systems zweier Teilchen nicht separieren könne, bevor man ein tatsächliches Experiment durchführe und dadurch überhaupt erst die Bedingungen für die Zuschreibung bestimmter Zustandswerte schaffe. Individuelle Zustände für die Bestandteile eines Paares gekoppelter Teilchen könnten genauso wenig klar getrennt werden wie der Zustand von mikroskopischem Teilchen und Messgerät. Die Kopenhagener Deutung verletzt darin das Prinzip der Separabilität.

Bis zuletzt gelang es Bohr nicht, mit Hilfe der Kopenhagener Deutung das EPR-Experiment so zu erklären, dass Einstein, Podolski und Rosen hätten einverstanden sein können. Als epistemische Theorie war dies möglicherweise auch kein zentrales Anliegen für ihn gewesen. Immerhin gelang mit Hilfe des Formalismus eine exakte Vorhersage, auch ohne zu rechnen - im Sinne des von uns formulierten Kriteriums *K* erzeugte die Kopenhagener Deutung also Verstehen; das Unbehagen über die Nichtberücksichtigung vieler Bündelkriterien für wissenschaftliches Verstehen blieb für manche Physiker jedoch bestehen. Einstein, Podolski und Rosen jedenfalls meinten bis zuletzt, dass an dem EPR-Experiment noch etwas mehr zu 'verstehen' sei, dass es ein 'Mehr' aufzuspüren gelte. In Kapitel 13 werden wir die Kopenhagener Deutung in Hinblick auf das EPR-Experiment noch einmal detaillierter diskutieren, dann bereits im direkten Vergleich mit den beiden anderen Interpretationen der Quantenmechanik.

Dazu stellt diese Arbeit im Folgenden die quantenmechanische Deutung von Tim Maudlin vor. Der amerikanische Philosoph hat einen Vorschlag gemacht, das EPR-Problem in einer kausalen Kollaps-Version zu interpretieren. Für ihn stellt sich das EPR-Problem ebenfalls als bislang unverstanden dar. Mit Hilfe eines über eine epistemische Deutung hinausgehenden kausal-

¹²Vgl. *Bohr*, N.: *Atomic Theory and the Description of Nature*. Cambridge University Press, Cambridge 1934. Auch in: *Faye*, J. und *Folse*, H.: *The Philosophical Writings of Niels Bohr*, Vol. IV, Ox Bow Press, Woodbridge 1998, S. 80.

10.4 Kopenhagener Deutung des EPR-Experiments

mechanistischen Ansatzes versucht er, das EPR-Experiment verstehbarer zu machen. Dabei diskutiert er auch, ob eine kausal-mechanistische Deutung des EPR-Problems, wie sie auch Einstein anstrebte, überhaupt möglich sein kann - oder ob sie an Inkompatibilitäten mit dem Rest der physikalischen Theorien (wie der Relativitätstheorie) scheitert.

11 Tim Maudlins kausale Kollapsdeutung des EPR-Experiments

11.1 Ein neues Konzept der Kausalität wird benötigt

Die Frage, inwiefern das EPR-Paradoxon kausal-prozessural (mechanistisch) erklärbar und dabei mit der speziellen Relativitätstheorie vereinbar ist, hat unter anderem auch der amerikanische Philosoph Tim Maudlin in seinem Buch "Quantum Non-Locality and Relativity"¹ sehr detailliert analysiert.² Für ihn, der sich mit einer epistemischen Interpretation des Kollapses der Wellenfunktion nicht zufrieden gibt, sondern - für ein besseres Verständnis des Vorgangs - nach einer physikalisch-mechanistischen Prozess-Interpretation sucht, stellt sich dieses Problem als zentrale Frage dar. Denn wenn eine Korrelation zwischen raumartig entfernten Teilchen besteht, deren Ursache physikalisch sein sollte, dann gilt es zu erklären, wie diese Korrelation physikalisch realisiert ist, und dies auf eine Weise, die sich möglichst konsistent in das physikalische Theoriegebäude einfügen lässt.

Bei seiner Analyse ergibt sich eine alternative Sicht auf den Begriff der Kausalität, die noch radikaler relativistisch ist als bisherige Definitionen. In letzter Konsequenz wird Maudlin Wertedefiniertheit verwerfen und zuletzt so-

¹ *Maudlin, T.:* Quantum Non-Locality and Relativity. Blackwell Publishing, Oxford 1994.

² Auf dieses Buch beziehen sich im Folgenden die in Klammern der Form (Maudlin, S. 100) vermerkten Seitenzahlen.

11 *Tim Maudlins kausale Kollapsdeutung des EPR-Experiments*

gar, trotz anfänglicher Bevorzugung von Kollaps-Theorien, sich auf eine Non-Kollaps-Theorie zurückziehen, die unter Physikern recht umstritten ist. Ob diese letzten Schritte notwendig sind, ist zu diskutieren. Wären sie notwendig, so käme die Frage auf, wie viel mehr Verständnis tatsächlich durch eine physikalistische Kollaps-Interpretation des EPR-Experiments erreicht wird - und ob der Gewinn an Verständnis gegenüber einer epistemischen Interpretation wie der Kopenhagener Deutung wirklich größer ist.

Im Folgenden soll Maudlins Gedankengang auf der Suche nach einem physikalischeren Verständnis des EPR-Paradoxons nachvollzogen und als ein Beispiel für die Entwicklung einer kausalen Beschreibung des EPR-Experiments diskutiert werden.

11.2 Ist die EPR-Korrelation kausal?

Die quantenmechanische Korrelation, wie sie auch im EPR-Fall auftritt, zeichnet sich primär dadurch aus, dass die raumartig entfernten Ereignisse statistisch voneinander abhängen, also nicht unabhängig voneinander sind. In der Tat scheint es keine bekannte Strategie zu geben, mit der man die Korrelation zwischen beiden Teilchen beschreiben (und vorhersagen) kann, ohne sich bei Betrachtung einer Seite (eines Messapparates) auch auf die andere Seite (den anderen Messapparat) zu beziehen. Da man wiederum den Messapparat auf einer Seite 'in letzter Sekunde' vor der Messung in seiner Einstellung verändern kann, hängt das Ergebnis der anderen Seite von einem raumartig entfernten Ereignis ab.

Wie aber lässt sich dies verstehen, fragt Maudlin. Muss es zwischen den Teilchen eine kausale Verbindung geben, die die Korrelationen erzeugt? Können wir die Korrelation anders als kausal verstehen? Im Zentrum der Diskussion wird im Folgenden für ihn die Frage stehen, ob Ursachen und gemeinsame Gründe (common causes) im Vergangenheitslichtkegel des Messereignisses liegen müssen oder nicht - und was wir daraus für das EPR-Experiment folgern können. Anschließend wird er die um eine relativistische Forderung erweiterte kontrafaktische Formulierung auf das EPR-Paradoxon anwenden, um zu zeigen, dass seiner Meinung nach dort eine Kausalverbindung vorliegen muss.

11.2 Ist die EPR-Korrelation kausal?

Natürlich impliziert eine Korrelation an sich zunächst nicht zwingend auch eine Kausalverbindung. Korrelationen können zufällig auftreten. In seinem Buch "Quantum Non-Locality and Relativity" betrachtet Maudlin das Beispiel einer Welt, in der beim Werfen zweier Würfel der eine von beiden zufällig immer die selbe Augenzahl aufweist wie der andere. Bewohner einer solchen Welt würden sicherlich annehmen, so Maudlin, diese Korrelation sei kausal erklärbar. Würden sie selbst nach langer Suche jedoch keinen kausalen Mechanismus entdecken, so würden sie vermuten, dieser sei ihnen nur bislang verborgen. Trotz bester Bemühungen wären sie durch den unglücklichen Zufall von immer wieder auftretenden Korrelationen getäuscht worden, einen kosmischen Zufall, eine Koinzidenz, für eine kausale Verbindung zu halten. Dazu Maudlin:

What, then, distinguishes an accidental correlation between the coins from a causal connection? The missing ingredient must go beyond the statistics of actual results. The obvious, and I think correct, diagnosis of the case of accidental correlation is that although the [dice] always match, they need not have. The result was accidental rather than due to a causal connection because the laws governing the [dice] did not imply that any correlation would exist. Or, put another way, in this case, the correlation does not support counterfactual inferences.³

Das fehlende Element, der Schritt von einer Korrelation zu einer Kausalverbindung, liegt also nicht in der Statistik, da diese, wie im obigen Würfelbeispiel, rein zufällig sein kann. Eine Statistik erlaubt zunächst keine kontrafaktische Konditionalaussage.

Um zu einer ersten Näherung an einen für das EPR-Problem angepassten Begriff der Kausalität zu gelangen, nämlich zu einer kontrafaktischen Formulierung der Kausalität, sucht Maudlin folglich zunächst nach einem Weg, Korrelationen und Kausalverbindungen zu unterscheiden. Zu zwei zufällig immer mit gleicher Augenzahl fallenden Würfeln könnte man keine kontrafaktische Aussage treffen - denn die Würfel könnten sich auch in jedem Augenblick wie-

³Maudlin, S. 127.

11 Tim Maudlins kausale Kollapsdeutung des EPR-Experiments

der anders verhalten. Eine Aussage der Form: 'Wäre der erste anders gefallen, so auch der zweite' macht bei solchen rein zufälligen Korrelationen keinen Sinn, denn hätte beispielsweise der eine Würfel statt einer '6' eine '4' gezeigt, so hätte der andere dennoch eine '6' oder eben ein anderes Würfelergebnis anzeigen können - es hätte sich aber aufgrund des anderen Würfelergebnisses am ersten Würfel nicht geändert.

Dennoch ist diese Erkenntnis für die Praxis möglicherweise nicht besonders hilfreich - denn im konkreten Fall ist es meist schwer, eine kontrafaktische Formulierung betreffend ihrer Gültigkeit zu überprüfen. In Bezug auf David Lewis Veröffentlichung "Causation"⁴ merkt Maudlin an, dass auch in Fällen kausaler Überbestimmtheit eine kontrafaktische Analyse nicht funktionieren würde. Dies verdeutlicht er an folgendem Fallbeispiel: "Die Raumfähre ist sicher gelandet: Ein Grund dafür ist, dass der Hauptcomputer mit Strom versorgt wurde. Doch selbst wenn die Elektrizität nicht funktioniert hätte, wäre ein Ersatzcomputer eingesprungen und die Fähre sicher gelandet."

Der Hauptcomputer ist also offensichtlich Teil der kausalen Gründe für die Landung - dennoch scheitert die kontrafaktische Analyse. Als *hinreichendes Argument* für eine physikalische Kausalverbindung bliebe die kontrafaktische Analyse jedoch bestehen - und dies sei in seiner Argumentation allein relevant, so Maudlin. So findet er in der kontrafaktischen Formulierung eine erste Näherung an seinen Kausalbegriff.

In der Tat ist die kontrafaktische Analyse für Maudlins Begriff der Kausalverbindung hinreichend, obwohl es kontrafaktische Abhängigkeiten gibt, die nicht kausal sind. Dieses scheinbare Paradoxon lässt sich in Maudlins Argumentation dadurch aufheben, dass er solche Fälle als unphysikalisch ausschließt. Sie träten ausschließlich zwischen nicht-physikalischen Ereignissen auf, und somit bliebe die kontrafaktische Analyse für die von ihm untersuchten 'physikalischen Fälle' als hinreichendes Anzeichen einer Kausalverbindung bestehen.

Was aber genau ist gemeint mit 'physikalischen' oder 'nicht-physikalischen' Ereignissen? Dafür erweitert Maudlin obigen Satz, um die Tatsache mit einzu beziehen, dass er sich in seiner Analyse mit lokalen physikalischen Ereignissen befassen will, nicht mit Ereignissen, die beispielsweise den Status entfernter

⁴Lewis, D.: Causation. The Journal of Philosophy, Vol. 70, No. 17 (1973), S. 556-567.

11.2 Ist die EPR-Korrelation kausal?

Objekte bezüglich unserer menschlichen Bewertung verändern. Dafür nennt er das Beispiel, dass als Ödipus seinen Vater ermordet, dessen Frau Jocasta in Theben zur Witwe wird. Hätte Ödipus seinen Vater nicht ermordet, wäre sie keine Witwe geworden. Dennoch ist das ‘Witwesein’ keine lokale physikalische Eigenschaft. Auch ist fraglich, ob das ‘Witwewerden’ ein physikalisches Ereignis ist und wann genau es eintritt. Um solche ‘Scheinprobleme’ auszuschließen, fügt Maudlin zu einer kausalen Implikation noch den Begriff ‘lokale physikalische’ Ereignisse hinzu: ”The local physical events A and B are causally implicated with one another if B would not have occurred had A not (or vice versa).”

An dieser Stelle und auch im Folgenden wird er den Begriff ‘lokaler physikalischer Ereignisse’ nicht exakter definieren, sondern mit einem allgemeinen Verständnis lokaler Ereignisse arbeiten. Er nennt als Beispiele das Klicken eines Photomultipliers, das Drehen eines Filters und ähnliches.⁵ Es scheint, als wäre damit nun ein hinreichendes Kriterium für eine Kausalverbindung definiert. Doch schnell wird aus einer scheinbaren Kausalverbindung doch nur etwas schwächeres. Dieses Schwächere nennt Maudlin eine ‘kausale Implikation’. Eine solche liege immer dann vor, wenn man den kontrafaktischen Kausalitätsbegriff symmetrisch anwenden könne, meint Maudlin. Dann ließe sich obiger Satz sowohl so formulieren, dass A B bedinge, als auch dass Ereignis B das Ereignis A bedinge.

Kausale Implikationen sind demnach nicht so stark wie Kausalverbindungen. Beispielsweise kann man in einer kausalen Implikation zwischen A und B nicht unbedingt Ursache von Wirkung unterscheiden. Betrachtet man beispielsweise eine Billardkugel, die von einer bestimmten Stelle der Wand abprallt und dann ins Loch fällt, ist in diesem Fall die spezielle Wandstelle, an der die Kugel abprallt, kausal impliziert mit dem Loch. Wäre die Kugel nicht an dieser Stelle abgeprallt, so wäre sie nicht ins Loch gefallen. Genauso könnte man aber sagen, dass, wäre sie nicht ins Loch gefallen, sie auch nicht an dieser Stelle hätte abprallen können.

⁵”The notion of a local physical event need not be fully explicated, but locally observable changes, such as getting paler, setting off a photomultiplier tube, and rotating a filter, certainly count; becoming a widow certainly does not” (Maudlin, S. 128).

11 *Tim Maudlins kausale Kollapsdeutung des EPR-Experiments*

Kausale Implikationen, so auch Maudlin, können symmetrisch sein zwischen Ursache und Wirkung, kausale Verbindungen jedoch nicht. Doch die kausale Implikation ist nicht nur zu schwach, um zwischen Ursache und Wirkung zu unterscheiden, sie besteht insbesondere auch zwischen zwei Ereignissen, von denen keines die direkte Ursache des anderen ist.

Man nehme beispielsweise an, man hätte die Billardkugel mit der 7 versenkt, kurz darauf jedoch fiel auch der Cueball in ein Loch. Nehmen wir an, es stellte sich heraus, dass es keinen Schuss gibt, bei dem man die 7 versenkt, ohne dass auch der Cueball versinkt. Keines der Ereignisse, das Ins-Loch-Fallen der 7 oder des Cueballs, verursacht das jeweils andere Ereignis. Es existiert zwischen ihnen kein 'mysteriöser' kausaler Prozess, so Maudlin:

No mysterious causal process directly connects the happening on different parts of the table. Still, given the disposition of the balls on the table, neither event would have happened without the other. The events are causally implicated with one another due to the operation of a common cause, viz. the interaction of the cue ball and 7, which sends each on its subsequent trajectory.⁶

Auch raumartig getrennte Ereignisse könnten also beispielsweise über gemeinsame Ursachen kausal impliziert sein, ohne dass deswegen kausale Prozesse mit Überlichtgeschwindigkeit ablaufen müssten. Im Folgenden wird Maudlin argumentativ zu belegen versuchen, dass im EPR-Fall jedoch keine rein kausale Implikation vorliegt, also keine gemeinsame Ursache die Korrelation erzeugt -, sondern dass es sich dabei tatsächlich um eine Kausalverbindung handeln muss.

11.3 Kausale Implikationen

Es könnte durchaus sein, dass der EPR-Fall eine bloße kausale Implikation darstellt und keine kausale Erklärung ermöglicht, da allein kontrafaktische Abhängigkeiten vorliegen. Die Tatsache, dass im EPR-Fall jedoch keine ge-

⁶*Maudlin*, S. 129.

meinsame Ursache existiert, bringt für Tim Maudlin Probleme mit sich. Für ihn, der nach einer prozessuralen Deutung des Kollapses sucht, muss im EPR-Fall mehr verstehbar sein als eine bloße kausale Implikation wie im Fall der Billardkugeln. Dass dies auch in der Tat der Fall sein könnte, erläutert Maudlin anhand des Vergangenheitslichtkegels der beiden korrelierten Teilchen.

Der Gedankengang ist dabei der Folgende: Wären alle kausalen Prozesse tatsächlich auf eine Propagationsgeschwindigkeit unterhalb der Lichtgeschwindigkeit beschränkt, dann wäre jedes Ereignis nur kausal beeinflussbar durch Ereignisse in seinem eigenen Vergangenheitslichtkegel, denn eben so ist der Vergangenheitslichtkegel definiert. Überdies könnte jedes Ereignis nur solche Ereignisse beeinflussen, die in seinem eigenen Zukunftslichtkegel liegen. Schließlich müsste folglich eine gemeinsame Ursache zweier Ereignisse im gemeinsamen Vergangenheitslichtkegel jener Ereignisse liegen, also in der Überschneidung ihrer einzelnen Vergangenheitslichtkegel.

Damit aber gälte Folgendes: Es seien A und B raumartig getrennte Ereignisse, wie beispielsweise die Messung der beiden Teilchen im EPR-Experiment. Ferner wissen wir, dass gilt, dass A nicht geschehen wäre (das Messergebnis am ersten Teilchen anders gewesen wäre), wenn B nicht geschehen wäre (wenn das Messergebnis am zweiten Teilchen anders gewesen wäre). Also gilt die kontrafaktische Abhängigkeit: wenn (nicht B), so (nicht A). Daraus folgt nun, dass, wenn mehr vorläge als eine kausale Implikation, in A's Vergangenheitslichtkegel noch ein Ereignis Y existieren müsste, für das gilt, dass, wäre B nicht gewesen, so auch nicht dieses Ereignis Y. Y könnte, so Maudlin, als gemeinsame Ursache von A und B gelten.

An dieser Stelle schließlich folgert Maudlin, dass, wenn kausale Einflüsse der Grenze der Lichtgeschwindigkeit genügen müssen, es nie der Fall sein kann, dass alles im Vergangenheitslichtkegel von A konstant bleiben kann (also auch Y), und trotzdem gilt, dass die raumartig getrennten A und B kontrafaktisch derart zusammenhängen, dass wäre B nicht geschehen, A nicht geschehen wäre. Maudlin formuliert also folgende *hinreichende Bedingung für Einflüsse, die mit Überlichtgeschwindigkeit operieren*:

If no causal influences are superluminal, then it cannot be the case

11 Tim Maudlins kausale Kollapsdeutung des EPR-Experiments

for spacelike separated A and B that A would not have occurred had B not occurred and everything in A's past light cone been the same. By keeping everything in the past light cone the same we keep all causal influences the same in a causally local theory.⁷

Für raumartig getrennte Ereignisse A und B, die derart zusammenhängen, dass ohne B auch A nicht gewesen wäre, kann bei der kontrafaktischen Formulierung (wenn B nicht, so A nicht) folglich nicht alles im Vergangenheitslichtkegel von A konstant gehalten (inklusive z. B. Y) und trotzdem eine wahre Aussage getroffen werden, denn dann ließen wir alle kausalen lokalen Einflüsse auf A konstant. Das Nichtauftreten des raumartig entfernten B hätte somit keine Möglichkeit eines kausalen Einflusses auf A (wie es ja auch in der Relativitätstheorie für raumartig entfernte Ereignisse der Fall ist). Auch könnte das Nichtauftreten von B keine Indikation für das Nichtauftreten von A sein, aus einem analogen Grund: Denn dann müsste B im Zukunftslichtkegel von A liegen, was durch die Prämisse raumartig getrennter Ereignisse ausgeschlossen wurde.

An dieser Stelle leitet Maudlin aus der Umkehrung des oben gegebenen Konditionals seine *hinreichende Bedingung für Überlichtgeschwindigkeitskausalität*⁸, *ausgedrückt durch kontrafaktische Konditionale*, ab:

Given a pair of spacelike separated events A and B, if A would not have occurred had B not occurred even though everything in A's past light cone was the same - then there must be superluminal influences.⁹

Maudlin selbst gibt zu, dass seine Definition von mit Überlichtgeschwindigkeit übertragenen kausalen Zusammenhängen im gewissen Sinne unzugänglich wirkt. Dies läge hauptsächlich daran, dass man keine kontrafaktischen Analy-

⁷Maudlin, S.130.

⁸Wir wollen im Folgenden der Einfachheit wegen den Begriff der Überlichtgeschwindigkeitskausalität durch den Begriff der Überlichtkausalität ersetzen.

⁹Maudlin, S. 130.

11.4 Überlichteinflüsse in deterministischen und indeterministischen Deutungen

sen im Experiment durchführen könne. Wir wissen nicht, wie die Welt ausgesehen hätte, wenn Ereignisse anders verlaufen wären.

Dennoch schwächt Maudlin selbst diese Kritik an seiner Definition. Immerhin seien Überlegungen dazu, was geschehen würde unter bestimmten Bedingungen, alltägliche Praxis der Naturwissenschaften. Dort würden stets Anfangsbedingungen geändert und die daraus resultierenden neuen Ergebnisse mit anderen Ergebnissen verglichen.

11.4 Überlichteinflüsse in deterministischen und indeterministischen Deutungen

Dass überhaupt über einen alternativen Kausalitätsbegriff nachgedacht werden muss - und Maudlin als ein Denker vorgestellt wird, der sich um eine kausale Deutung des EPR-Experiments bemüht - liegt letztlich daran, dass ein Kausalitätsverständnis, bei dem Kausalzusammenhänge sich an die Grenze der Lichtgeschwindigkeit halten, das EPR-Paradoxon bislang nicht kausal erklären kann. Somit ist eine Ausgangsfrage dieser Arbeit noch immer unbeantwortet: Können wir das EPR-Paradoxon folglich prinzipiell nicht kausal verstehen?

Wichtig zu erwähnen ist an dieser Stelle, dass das Problem der scheinbaren Überlichteinflüsse, wie sie beim EPR-Experiment auftauchen, nicht etwa davon abhängt, ob man eine deterministische oder eine indeterministische Deutung der Quantenmechanik betrachtet. Gleich, ob man eine deterministische Interpretation, wie die von David Bohm, oder eine indeterministische, wie die Kopenhagener Deutung, oder den statistischen Ansatz von Gerard, Rimini und Weber bevorzugt, immer taucht das Problem auf, dass ein raumartiges Ereignis, nämlich die Einstellung eines raumartig entfernten Detektors, einen Einfluss zu haben scheint auf die verschränkten Teilchen - und insbesondere auf das bei Messung des einen Teilchens raumartig entfernte zweite Teilchen.

Tatsächlich wird Maudlin am Ende seiner Analyse zu dem Schluss kommen, dass stochastische Theorien unabdingbar Überlichteinflüssen bedürfen, aber auch deterministische Theorien sich dieser Notwendigkeit nicht entziehen

11 Tim Maudlins kausale Kollapsdeutung des EPR-Experiments

können, obgleich diese stärker den Anschein erwecken, eine Hoffnung für eine konsistente physikalische Theorie darstellen zu können:

”Stochastic Theories involve an obvious element of superluminal causation. Deterministic theories were the only hope for locality from the beginning, a hope Bell extinguished.”¹⁰

Im Zentrum der Diskussion deterministischer oder indeterministischer Deutungen steht der Kollaps der Wellenfunktion, der mit dem Messereignis einhergeht. Tatsächlich muss man nur feststellen, dass mit dem Wellenkollaps in allen Kollaps-Interpretationen ein stochastisches Element in die Theorie und die Dynamik eingeführt wird. Es fällt eine indeterministische Entscheidung.

Maudlin erwähnt an dieser Stelle nicht, ob seine folgende Analyse sich auch auf Theorien übertragen lässt, die ganz ohne Kollaps auskommen, wie beispielsweise die Viele-Welten-Theorie. Zwar schließt seine Diskussion auch die Bohmsche Theorie ein, in der die Eigenwerte zu jedem Zeitpunkt wohldefiniert vorliegen, in der also kein Kollaps im Sinne der Kopenhagener Deutung (Reduktion der Superposition, Auswahl eines wohldefinierten Eigenwertes) stattfindet - ob sich aus dieser Tatsache, dass die Bohmsche Deutung von Maudlin betrachtet wird, jedoch verallgemeinern lässt, dass seine folgende Analyse auf alle möglichen Nicht-Kollaps-Theorien zutrifft, ist damit nicht bewiesen.

Wichtig ist für Maudlin jedoch hauptsächlich, dass mit der Messung an einem Teilchen eine ‘Veränderung’ an diesem und ebenso auch am zweiten Teilchen herbeigeführt wird. Dieser Begriff ist möglicherweise weit genug, auch das Aufspalten der Welten beinhalten zu können, die mit einem Messereignis in der Viele-Welten-Theorie einhergeht. Auch in der Kopenhagener Deutung kollabiert bei der Messung die Wellenfunktion. Diese ‘Veränderung bei Messung’ in den verschiedenen Interpretationen zu beschreiben und ihren Kausalstatus zu untermauern, ist Ziel von Maudlins nun folgender Argumentation. Dabei bezieht sich Maudlin einerseits, wie eingangs erwähnt, auf *deterministische Theorien*, die keinen Kollaps benötigen, wie die Bohmsche Interpretation, als

¹⁰Maudlin, S. 138.

11.4 Überlichteinflüsse in deterministischen und indeterministischen Deutungen

auch auf *statistische Interpretationen*, die einen Kollaps beinhalten, die also annehmen, dass die Wellenfunktion zu einem bestimmten Augenblick reduziert wird: die Superposition also auf einen bestimmten Eigenwert ‘kollabiert’.

Der Grund für Maudlins Bevorzugung von Kollaps-Theorien liegt in seinem Verständnis der Quantenmechanik: Die deterministische Entwicklung der Wellenfunktion, wie die Schrödingergleichung sie vorschreibt, kann seiner Meinung nach keine vollständige Naturbeschreibung darstellen. Anders gesagt: Eine nicht schrödingersche Entwicklung wie der Kollaps der Wellenfunktion wird in jeder Interpretation benötigt, die davon ausgeht, dass die Wellenfunktion ψ eine vollständige Beschreibung darstellt. Wenn dann kein nicht-schrödingersches Element eingeführt würde, träfe man auf das Paradoxon von Schrödingers Katze, wonach niemals wohldefinierte Messergebnisse auftreten.

If Schrödinger's equation is universally valid and the wave-function is a complete description of physical reality then the cat simply does not end up either alive or dead. Wave-collapse cannot be a mere artifact of coming to know whether the cat lived or died if the laws of physics imply that neither event occurred.¹¹

In diesem Punkt stimmt Maudlin auch mit der Kopenhagener Deutung überein, die davon ausgeht, dass es außerhalb der Wellenfunktion keine weiteren ‘verborgenen Fakten’ gibt, die den Zustand der Welt spezifizieren könnten, wie verborgene Teilchenpositionen oder ähnliches. Die Wellenfunktion evolviert in der Kopenhagener Deutung deterministisch nach der Schrödingergleichung - und verändert sich auf andere Weise während des Wellenkollapses.

Nimmt man also, mit der Mehrheit der Physiker und im Rahmen der Kopenhagener Deutung, an, dass die Schrödingergleichung bestimmte Prozesse exakt beschreibt - nämlich die Entwicklung einer ungestörten Wellenfunktion - so fehlt anscheinend ein Element in der Theorie: und zwar die Beschreibung des Entstehungsprozesses eines eindeutigen Messergebnisses.

In der Bohmschen Theorie muss, wie in dieser Arbeit noch ausführlicher

¹¹Maudlin, S. 133.

11 *Tim Maudlins kausale Kollapsdeutung des EPR-Experiments*

diskutiert werden soll, dieser Prozess nicht mit dem Kollaps der Wellenfunktion einhergehen, denn dort besteht die Welt aus zwei Sorten von Objekten: der Wellenfunktion, die sich deterministisch entwickelt, und Teilchen, die allzeit wohldefinierte Orte besitzen, deren Trajektorie von den Positionen der umliegenden Teilchen abhängt. Die Wellenfunktion ψ kollabiert in der Bohmschen Interpretation also zu keinem Zeitpunkt, sondern es existieren zu jedem Zeitpunkt Teilchen mit exaktem Ort und Impuls, die sich wie Staubkörner auf einer Wasseroberfläche von der Wellenfunktion ψ forttragen lassen und die durch Funktionen $f(\psi, x)$ beschrieben werden, wobei x für die Positionen aller anderen Teilchen steht - was die Bohmsche Theorie manifest nichtlokal macht. Die Werte von Ort und Impuls aller einzelnen Teilchen sind durch die Theorie dennoch nicht zu jedem Zeitpunkt spezifiziert, sie sind vielmehr 'verborgene Parameter' - die Theorie ist unvollständig.

In der Kopenhagener Deutung gibt es wiederum keine verborgenen Parameter, die Wellenfunktion ist eine vollständige Beschreibung der quantenmechanischen Zustände. Deswegen braucht man in dieser Interpretation, um die Entstehung definierter Messwerte (Eigenwerte) zu erklären, einen Kollaps, der aus einer Superposition aller Möglichkeiten einen Eigenwert auswählt - denjenigen, den wir im Experiment vorfinden, denn eine Superposition aller Eigenwerte und Eigenzustände würden wir eben nicht messen - diese Superposition muss folglich vor dem Messprozess oder eben im Messprozess verschwinden.

Ob der Kollaps der Wellenfunktion dabei durch Beobachtung, Messung, Gedanken, makroskopische Veränderungen oder reinen Zufall ausgelöst werde - ein Spektrum bekannter quantenmechanischer Interpretationen -, sei für seine Diskussion nicht weiter relevant, meint Maudlin. Letztlich reduziert er die für ihn relevante Problematik auf zwei Fragen: Wie können wir die in deterministischen Theorien anscheinend benötigte Überlichtkausalität mit der Speziellen Relativitätstheorie vereinigen? Und: Woran liegt es, dass eine statistische Theorie keinesfalls ohne Überlichteinflüsse auskommt, wenngleich doch ihre Ereignisse nicht kausal sind?

11.5 Überlichteinflüsse nicht eliminierbar

In einer deterministischen Theorie müssten alle möglichen kausalen Ursachen für ein Messergebnis, also jene Ursachen, die höchstens mit Lichtgeschwindigkeit im Kontakt mit ihren Wirkungen stehen, im Vergangenheitslichtkegel des Messereignisses liegen. Dies kann aber im EPR-Experiment nicht der Fall sein, denn dann wäre das Ergebnis unabhängig vom Aufbau des raumartig entfernten Messgerätes. Dies wiederum kann nicht die Bell-Korrelationen erklären, die man misst.

Da aber ein kontrafaktisches Konditional gilt, wonach gilt dass, ‘wäre der entfernte Polarisator anders eingestellt gewesen, so wäre das lokale Ergebnis ein anderes’, so muss - bei Annahme einer prozessuralen Deutungsmöglichkeit des Kollapses - der entfernte Polarisator einen Einfluss besitzen, obwohl sein Einstellungsprozess, die Ausrichtung des Filters etc., nicht im Vergangenheitslichtkegel des lokalen Messprozesses liegt. Wird jedoch etwas im Vergangenheitslichtkegel des lokalen Messereignisses verändert, so liegt eine kausale Verbindung vor, die mit Überlichtgeschwindigkeit arbeitet:

[...]changing the distant setting either does not require changing anything in the past light cone of the local measurement, or if it does, this is already a case of superluminal causation.¹²

The indeterministic case has seemed to be the main hope for avoiding superluminal causation. The general reason for optimism here is clear: in an indeterministic world the evaluation of counterfactual claims becomes problematic.¹³

Diese erschwerte Analyse kontrafaktischer Aussagen spiegelte sich im Atomzerfall wider. Wenn ein Atom um 12 Uhr zerfällt, so sei es in einer statistischen Welt unmöglich zu sagen, ob es auch zerfallen wäre, wenn etwas in seinem Vergangenheitslichtkegel anders gewesen wäre. Tatsächlich ist die Situation in einer statistischen Welt nicht ganz einfach zu analysieren: denn es ist nicht

¹²Maudlin, S. 134.

¹³Maudlin, S. 135.

11 *Tim Maudlins kausale Kollapsdeutung des EPR-Experiments*

möglich zu sagen, dass das Messergebnis ein anderes oder dasselbe gewesen wäre, wenn umgebende Faktoren anders gewesen wären -, denn wenn man so spricht, impliziert man doch, dass vorausgehende Faktoren das Atom dazu prädestinierten, um 12 Uhr zu zerfallen oder es daran hinderten zu zerfallen. In einer stochastischen Welt ist die Anwendung der kontrafaktischen Analyse also deutlich erschwert:

So in a stochastic world one must take great care either with the evaluation of counterfactuals or with the analysis of causation in terms of counterfactuals, else every event be adjudged a cause of every other simply in virtue of the indeterminism.¹⁴

The fundamental feature of a stochastic process is that it could have come out differently even though all of its causal antecedents were unchanged.¹⁵

Ein Beispiel für kontrafaktische Analysen, die bei stochastischen Prozessen jedoch greifen, sieht man am EPR-Experiment: Nimmt man an, dass mindestens einer der Messprozesse im EPR-Fall indeterministisch vor sich geht, und nimmt man ferner an, beide Polarisatoren seine in dieselbe Richtung ausgerichtet. In diesem Fall gilt, dass, würden beide Photonen absorbiert, so eines von ihnen aufgrund eines zufälligen Entscheidungsprozesses. Wäre jedoch ein Photon hindurchgegangen (nicht absorbiert worden), so wissen wir mit Sicherheit, dass auch sein Partner hindurchgegangen wäre. Diese kontrafaktische Aussage lässt sich formulieren, wodurch die beiden Ereignisse miteinander kausal impliziert werden.

Dies alleine scheint noch keiner Überlichtinteraktionen zu bedürfen. Ein gemeinsamer Grund lässt sich leicht ausschließen, was daran liegt, dass vorhergehende Ereignisse keinen kausalen Einfluss ausüben. Der Vergangenheitslichtkegel eines indeterministischen Prozesses übt also keinen Einfluss auf das Ergebnis des Prozesses aus - gerade so ist ein indeterministischer Prozess ja definiert. Deswegen erfüllt die kontrafaktische Bedingung zwischen zwei inde-

¹⁴Maudlin, S. 135.

¹⁵Maudlin, S. 136.

terministischen Photonen Maudlins hinreichende Bedingung für die Notwendigkeit einer Überlichtkausalität:

The indeterministic measurement process could have come out differently even though its entire past light cone were unchanged. And had it come out differently so would the other, spacelike separated measurement.¹⁶

Weil die Photonen korreliert sind und der Vergangenheitslichtkegel keine Rolle spielt (er also unverändert bleiben kann), bleibt für Maudlin - in Hinblick auf den Versuch einer kausalen Deutung des EPR-Experiments - als Erklärung der Korrelation nur eine Überlichtinteraktion zwischen den Photonen. Tatsächlich könnte die Korrelation entweder durch eine direkte kausale Verbindung erklärt werden, oder dadurch, dass die entfernte Messung etwas im Vergangenheitslichtkegel der lokalen Messung ändert. In jedem Falle aber lägen Überlichteinflüsse vor, denn sonst würden die einzigen Ereignisse, die kontrafaktisch vom stochastischen Ereignis abhängen können, im Zukunftslichtkegel des Messereignisses liegen.

Maudlin folgert also, dass es unabhängig von Interpretationen unmöglich sein soll, einer Überlichtkausalität zu entkommen: Im stochastischen Fall könne man sonst nicht die perfekten Korrelationen erklären, und im deterministischen Fall sei die Bellsche Ungleichung zu beachten, die rein klassische Korrelationen (die sich an die Lichtgeschwindigkeit halten) in lokalen Theorien zu Erklärung der quantenmechanischen Ergebnisse als unmöglich ausweise.

11.6 Kollaps als kausale Verbindung

Da die EPR-Korrelationen im Argumentationssystem der vorangegangenen Überlegungen (mit dem Ziel einer kausal-prozessuralen Kollapsdeutung) eine kausale Verbindung benötigen - insbesondere auch die stochastische Interpretation - muss die 'Messung' des einen Photons folglich eine kausale Auswirkung

¹⁶Maudlin, S. 136.

11 *Tim Maudlins kausale Kollapsdeutung des EPR-Experiments*

auf das ‘Ergebnis’ der Messung des zweiten Photons haben. Wie eine solche Auswirkung auszusehen hat, wird sicherlich von der Interpretation des Kollapses der Wellenfunktion abhängen.

Laut Kollapstheorien haben die beiden Photonen bei Aussendung und auf dem Weg keine festgelegten Eigenschaften: beispielsweise keine wohldefinierte Polarisation. Für beide lassen sich nur Wahrscheinlichkeiten für bestimmte Polarisationen angeben. Bei einer Messung aber ergeben sich definierte, korrelierte Werte für die Eigenschaften der Photonen, beispielsweise eine horizontale oder vertikale Polarisation.

Es ist eben dieser Übergang zwischen bestimmt und unbestimmt, der Einstein, Rosen und Podolski Sorgen bereitete. Die Option, dass der Wellenkollaps ein realer physikalischer Prozess sein könnte, der durch die Messung an einem der beiden raumartig entfernten Photonen herbeigeführt wird und mit Überlichtgeschwindigkeit eine kausale Verbindung zwischen den Photonen nach sich zieht - um die Ergebnisse zu korrelieren -, mussten Einstein, Podolski und Rosen als Anhänger des lokalen Realismus als unphysikalisch verwerfen. Deswegen schlossen sie, dass die Quantenmechanik unvollständig sei und es verborgene Parameter geben müsse, die die Ergebnisse der Messung im EPR-Experiment auf lokale, prozessurale, kausale Weise erklären, also beschreibbar machen würden. Erst 30 Jahre später sollte John Bell zeigen, dass man damit die Lokalität auch nicht erhalten konnte.

In den meisten physikalischen Lehrbüchern wird der Kollaps der Wellenfunktion nicht als physikalischer Prozess beschrieben. Maudlin sieht es als einen beklagenswerten Denkfehler an, dass Physiker sich nicht weiter um dessen physikalische Form ‘kümmern’ - dies sei wesentlich, wolle man das EPR-Paradoxon verstehen.

Hauptsächlich sieht er das Problem darin, dass die meisten Physiker die Wellenfunktion als vollständige Beschreibung ansehen (also eine Kollapsdeutung verwenden, die notwendig ist, um die schrödingersche deterministische Entwicklung der Superposition mit den Messergebnissen zu verbinden), und zugleich jedoch annehmen, dass die Schrödingergleichung universell gelte (was aber nur in einer Nichtkollapstheorie der Fall sein könnte, wie beispielsweise in der Bohmschen Deutung) - ein Paradoxon. Darüber hinaus würden Phy-

11.6 Kollaps als kausale Verbindung

siker oft zwei verschiedene Kollapsdeutungen miteinander vermischen: Einerseits nehme man an, dass die Wellenfunktion vollständig sei - eine Annahme, die allen Kollapsdeutungen gemeinsam ist -, andererseits aber wird der Wellenkollaps oft als rein epistemisch beschrieben - eine Annahme, die allein die Kopenhagener Deutung vertritt.

Physicists tend to be of two minds about the wave-function. On the one hand, [it] is held to be a complete description of physical reality: 'hidden' variables are rejected. On the other hand, reduction of the wave-function is considered to be merely epistemic: it reflects a change only in our knowledge of the world, not in the world itself.¹⁷

Physiker tendierten also dazu, eine allen Kollapsdeutungen gemeinsame Annahme (die der Vollständigkeit der Wellenfunktion) mit der speziellen Kopenhagener Interpretation, einer rein epistemischen Kollapsdeutung, zu vermischen. Gehorchte die Wellenfunktion außerdem zu allen Zeiten der Schrödingergleichung, so würde nur für alle Zeiten die vollständige Wellenfunktion generiert - und nicht einzelne Fakten aus der Superposition. Daher müsste man konsequenterweise entweder eine nichtschrödingersche Entwicklung als physikalischen Prozess ernst nehmen, wenn man nicht gerade der Viele-Welten-Theorie anhängen will, oder die Wellenfunktion als unvollständig ansehen - so Maudlins Argumentation.

Nimmt man eine nichtschrödingersche Entwicklung der Wellenfunktion an, so wird die Mehrheit der Physiker zustimmen, dass diese nicht (räumlich) vor dem Detektor im EPR-Experiment stattfinden kann. Nur der verschränkte Zustand erzeugt die perfekten Korrelationen der Messwerte. Die Passage durch den Polarisator hingegen erzeugt Eindeutigkeit und produziert nicht etwa eine Welt, in der das Photon sowohl absorbiert wurde als auch den Filter passiert (außer in der Viele-Welten-Interpretation) - sondern führt zu dem einen *oder* dem anderen Ergebnis. Ferner ändert sich das entfernte Photon in perfekter Korrelation. Also zeige der Kollaps der Wellenfunktion eine physikalische Zustandsänderung an, bei dem der Zustand eines Photons durch Ereignisse

¹⁷Maudlin, S. 133.

11 *Tim Maudlins kausale Kollapsdeutung des EPR-Experiments*

in raumartiger Entfernung geändert werde - so Maudlins, aber beispielsweise auch Bohrs Interpretation.

Nimmt man jedoch andererseits, wie auch Einstein, Podolski und Rosen, die Nichtvollständigkeit von ψ an, so gelangt man unter anderem zu Bohms Theorie. Auch in dieser gibt es ein Äquivalent zum Wellenkollaps: Die Teilchen füllen entweder den 'lebenden' oder den 'toten' Möglichkeits-Ast der Schrödingerschen Katze aus. Befindet sich ein Teilchen erst einmal auf einem der beiden 'Äste', hängt seine weitere Entwicklung nur von diesem Ast ab, als gäbe es den anderen gar nicht - die Wellenfunktion ist effektiv (für die Teilchen) kollabiert. Zwar bleibt theoretisch die ganze Superposition bestehen, die Teilchen 'spüren' aber nur Teile davon (siehe dazu Kap. 12).

Doch auch, wenn der Kollaps als solcher hier kein Überlichtprozess wäre, blieben mit Überlichteffekte auch in Bohms Theorie bestehen. Dies liegt daran, dass die Position von Teilchen von der Position von raumartig entfernten anderen Teilchen abhängt - und sich somit instantan ändert, wenn die anderen Teilchen ihre Position ändern. Kontrafaktische Kausalverbindungen bleiben also in allen Interpretationen bestehen, so Maudlin: Kausalverbindungen, die mit Überlichtgeschwindigkeit operieren müssen.

11.7 Überlichtkausalität und Lorentzinvarianz

Tatsächlich scheint es, als müsse eine Kausalität, die sich schneller als mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten kann, die Relativitätstheorie verletzen, die die Lichtgeschwindigkeit als oberste Grenze definiert. Ein wichtiges Argument, warum ein Ereignis keine Auswirkungen auf ein raumartig entferntes Ereignis haben kann, ist, dass eine zeitliche Ordnung von Ursache und Wirkung für raumartig getrennte Ereignisse prinzipiell nicht festgelegt werden kann. Daher ist Kausalität mit Überlichtgeschwindigkeit in der Speziellen Relativitätstheorie zunächst scheinbar nicht möglich. Allerdings wendet Maudlin ein, dass Ereignisse, bei denen die zeitliche Ordnung nicht eindeutig angegeben werden kann und in denen folglich beispielsweise die Möglichkeit existiert, dass die Wirkung vor der Ursache liegt, kohärent beschrieben werden können, wenn sich eine Markierung auf den Relata finden lässt oder die Relata bestimmte Eigenschaften besitzen (wie Kontrollierbarkeit), die dieses Relata vor dem anderen als Grund auszeichnet.

In der Quantenkorrelation ist eine solche Kontrollierbarkeit allerdings nicht vorhanden, da man kein spezielles Ergebnis an einem der Teilchen oder Photonen induzieren kann, woraufhin ein Beobachter am raumartig entfernten Messgerät unsere Entscheidung übermittelt bekäme. Keines der Messergebnisse kann in dieser Weise als Grund für das andere Ergebnis gelten, die Verbindung besitzt keine ausgezeichnete Eigenschaft wie Kontrollierbarkeit. Stützte man sich hingegen auf die kontrafaktische Formulierung, die keine Seite als Grund oder Wirkung auszeichnen muss, so sind die Ereignisse in bestimmter Weise kontrafaktisch verbunden, so dass die Verbindung 'kausal' heißen kann, ohne dass deswegen ein Ende als Ursache ausgezeichnet wäre.

In einer Welt, in der raumartige korrelierte Ereignisse auftreten, wird es Beobachter geben, die Messung A vor Messung B beobachten - und andere, deren Beobachtung Messung B als erste Messung auszeichnet. Sie verwenden dabei die Zeitordnung auch als Definitionsbasis für Ursache und Wirkung. Verschiedene Beobachter würden dadurch unterschiedliche Aussagen machen, welches Photon als erstes gemessen worden sei und somit Ursache des Kollapses genannt werden darf. Solche Überlichtkausalität führt unausweichlich

11 Tim Maudlins kausale Kollapsdeutung des EPR-Experiments

zu rückwärts gerichteter Kausalität ('backwards causation'), die wiederum Inkonsistenzen mit sich bringen kann.

Beide Beobachter könnten sich jedoch immerhin darauf einigen, dass (!) eine Verbindung zwischen den Photonen vorlag. Sie können sich nur nicht auf Ursache und Wirkung einigen. Möglicherweise, so Maudlin, wird man beide Geschichten als 'wahr' ansehen müssen. In diese Richtung wird Maudlin schlussendlich argumentieren: für ein Relativitätskonzept der Kausalität und der Realität.

Überlichtkausalität würde damit das Prinzip einführen, dass ein erkennbarer Grund einer erkennbaren Wirkung nicht in *jedem* Referenzsystem vorhergehen muss. Jedes Bezugssystem könnte seine eigene Geschichte erzählen. Und da im EPR-Fall keine Signale gesendet werden können, entstehen in solchen Systemen auch keine kausalen Schleifen, die Paradoxa produzieren.

Tatsächlich tritt erst dann ein Problem auf, wenn ein Bezugssystem den anderen gegenüber bevorzugt wird. Es kommt also möglicherweise eher auf *Lorentzinvarianz* an als darauf, um jeden Preis Einflüsse zwischen raumartig entfernten Systemen zu verhindern. Die entscheidende Frage scheint also zu sein, ob kausale Zusammenhänge sich lorentzinvariant formulieren lassen und wie die kausale Verbindung 'physikalisch realisiert' ist - wie genau sie beschreibbar ist.

11.8 Maudlins Lösungsansatz, Vorüberlegungen

Laut Tim Maudlin zeigt es sich also, dass unabhängig vom deterministischen oder statistischen Charakter einer quantenmechanischen Beschreibung des EPR-Experiments die auftretenden Korrelationen nur über eine Verbindung zwischen den Photonen erklärt werden können, die kausal ist und mit Überlichtgeschwindigkeit operiert. Für ihn stellt sich somit die zentrale Frage: Kann eine nichtlokale Welt - wie das EPR-Experiment und die Aspect-Experimente sie uns zeigen - lorentzinvariant beschrieben werden? Können wir also einen Kausalbegriff finden, der die Korrelationen zwischen den Teilchen beschreibt, ohne die Spezielle Relativitätstheorie zu verletzen? Können wir dann verstehen, was

11.8 Maudlins Lösungsansatz, Vorüberlegungen

beim EPR-Experiment ‘geschieht’?

Quantenfeldtheorie, die von Anfang an lorentzinvariant formulierte ‘Erweiterung’ der Quantenmechanik, stellt für die Argumentation seiner Meinung nach keine Lösung dar. Zwar sei dort angeblich die Überlichtkausalität durch die ‘Equal Time Commutation Relation’ sicher ausgeschlossen, wonach Operatoren an verschiedenen Raumzeitpunkten grundsätzlich miteinander kommutieren - einander also nicht in der Statistik der Messergebnisse beeinflussen - nach Maudlin jedoch löst das das Problem nicht:

We have seen that reliable reproduction of the quantum statistics demands superluminal causation and superluminal information transmission. [...] It is sometimes claimed, that the relativistic credentials of quantum field theory are secured by the so-called Equal Time Commutation Relations [...] all of our investigations reveal the emptiness of this claim.¹⁸

In Wirklichkeit sei damit nur das Senden von Signalen mit Überlichtgeschwindigkeit ausgeschlossen, so das Argument, nicht aber eine Kausalitätsverbindung in seiner oben gegebenen Definition. Korrelationen zwischen raumartig getrennten Regionen sind von Kommutator-Relationen nicht betroffen - diese wurden in der obigen Argumentation nie verwendet oder vorausgesetzt.

Die Tatsache, dass Operatoren vertauschen, zeigt letztlich nur, dass Messungen, die an einer Seite durchgeführt werden, auf lange Zeit nicht die Statistiken der anderen Seite verändern. Dies bedeutet, dass keine Signale gesendet werden können. Andererseits hatte es sich in Maudlins Analyse aber gezeigt, dass Überlichteinflüsse dennoch benötigt werden, um die Korrelationen zwischen den raumartig entfernten Regionen zu erklären. Darüber jedoch lässt sich mit Hilfe kommutierender Operatoren keine Aussage treffen.

Anders als in der Newtonschen Theorie, wo man eine Verzögerung in der Gravitationswirkung erfolgreich über Einsteins Theorie einfügen konnte und so die nichtlokalen Probleme aus dem Weg räumte, gelingt dies in der Quan-

¹⁸Maudlin, S. 194.

11 Tim Maudlins kausale Kollapsdeutung des EPR-Experiments

tenmechanik nicht. In dem Moment, in dem das erste EPR-Photon gemessen wird, geschieht bei beiden Photonen eine plötzliche Veränderung: von undefiniert zu wohldefiniert - ein Eigenwert wird angenommen. An dieser Stelle soll auch erwähnt werden, dass Maudlins Ansatz, diese Annahme eines Eigenwertes auf beiden Seiten des EPR-Experiments als physikalischen Prozess zu betrachten - also den Zustandswechsel realistisch zu interpretieren - auch den Vorteil bietet, dass es dadurch keine Größen in der Theorie gibt, denen nichts in der Welt entspricht.

Im Minkowskiraum lässt sich diese realistisch-physikalistische Theorie des Wellenkollapses aber nicht leicht beschreiben, denn der Kollaps kann nur in einem Bezugssystem instantan sein. Dies bedeutet also, dass entweder eine Eigenschaft des EPR-Falls ein spezielles Bezugssystem auswählt, oder dass der Kollaps doch nicht instantan ist.

In Analogie zur Gravitationstheorie mag man zu letzterem Fall tendieren. Es bleibt jedoch das Problem bestehen, dass ein verzögerter Kollaps - der sich entlang des Zukunftslichtkegels des Messprozesses ausbreitet - zu spät käme, er könnte nie die perfekten Korrelationen an raumartig entfernten Messapparaturen erklären. Den Versuch, die Quantenfeldtheorie (QFT) und die Spezielle Relativitätstheorie (SRT) zu vereinen und eine relativistische Theorie des Kollapses zu erreichen, hat auch John Cramer¹⁹ unternommen. Dabei soll der Kollaps entlang des Vergangenheitslichtkegels eines Prozesses geschehen. Cramer hat sich dabei von Richard Feynmans und John Wheelers retardierten und avancierten elektromagnetischen Wellen inspirieren lassen. In seinem Modell sendet einerseits ein Emitter eine Wellenfunktion nach vorne in der Zeit zu einem Absorber - dieser aber sendet ferner eine Wellenfunktion zurück in der Zeit zum Emitter. Dazu Maudlin: "The state of the absorber thereby influences the emission event, allowing the production only of photons in appropriate definite states of polarization."²⁰

Auf diese Weise erklärt Cramer die Quantenkorrelationen über raumar-

¹⁹Vgl. *Cramer, J.: Generalized Absorber Theory and the Einstein-Podolski-Rosen Paradox. Physical Review, D 22 (1980), S. 362-376.*

Cramer, J.: The Transactional Interpretation of Quantum Mechanics. Review of Modern Physics, 58 (1986), S. 647-687.

²⁰Maudlin, S. 197.

11.8 Maudlins Lösungsansatz, Vorüberlegungen

tige Entfernungen hinweg. Doch besitzt diese Theorie wie alle Theorien, die den Kollaps der Wellenfunktion als physikalischen Prozess auffassen wollen, schwerwiegende Probleme: wie beispielsweise, dass man rückwärts wirkende Kausalität akzeptieren muss, was mit einer statistischen Theorie nicht ganz leicht zu vereinbaren ist, da die Zukunft - die vom stochastischen Prozess erst bestimmt werden soll - diesen Prozess beeinflussen würde. Dieses Problem sieht auch Maudlin als schwerwiegendes Argument gegen Cramers Ansatz und bemerkt:

Producing a consistent theory which incorporates both directions of causation is a tricky business, and is especially difficult if the theory is to be stochastic rather than deterministic. [...] the stochastic outcomes at a particular point in time may influence the future - but that future itself is to play a role in producing the outcomes.²¹

Betrachtet man die dadurch entstehenden Probleme genauer, müsste man eine Sequenz von Ereignissen in einer von Cramer so genannten 'Pseudozeit' ("pseudotime sequence")²² akzeptieren, deren ontologischer Status völlig ungeklärt sei. Cramer selbst hielt die Pseudozeit für eine 'semantische Angelegenheit', um den 'Prozess des EPR-Experiments' zu beschreiben. Allerdings findet der Wellenkollaps nur in Pseudozeit statt, der Beobachter sieht nur die fertige Transaktion - damit aber liegt in realer Zeit auch nie etwas anderes vor als allein diese vollendete Transaktion. Es existiert in realer Zeit nie eine unkollabierte Welle. Wie damit eine stochastische Theorie beschrieben werden soll, bleibt unklar.

Insgesamt kommt der Wellenkollaps, so er sich über den Zukunftslichtkegel ausbreiten will, zu spät, und der Kollaps über den Vergangenheitslichtkegel trifft auf gravierende Probleme, die bis heute ungelöst sind und kein konsistentes Bild einer stochastischen Theorie zulassen. Eine von Maudlin daher

²¹Maudlin, S. 197.

²²Cramer, J.: The Transactional Interpretation of Quantum Mechanics. Review of Modern Physics, 58 (1986), S. 661.

11 Tim Maudlins kausale Kollapsdeutung des EPR-Experiments

propagierte Lösung dieses Problems ist die Wahl von Hyperebenen, entlang derer der Kollaps instantan ist.²³

Die Wahl einer Hyperebene determiniert dann, welcher Messprozess zuerst geschieht, also an welchem Ende der stochastische und an welchem Ende der Messung der deterministische Prozess abläuft.

Das Auswählen einer bestimmten Hyperebene ist jedoch kein lorentzinvarianter Vorgang. Als Lösung dieses Problems schlägt Maudlin vor, das Relativitätsprinzip noch einen Schritt weiter ernst zu nehmen und eine relativistische Gleichberechtigung auf alle Hyperebenen auszudehnen: In jeder Hyperebene, so sein Vorschlag, findet der Kollaps instantan statt! Damit wäre jede Hyperebene bevorzugt (und somit keine), und in jeder Ebene könnte man einen konsistenten physikalischen Bericht abgeben. Dennoch würden sich diese Berichte radikal voneinander unterscheiden. Dies müsse einen Physiker oder Philosophen, der sich mit relativistischen Problemen auskennt, jedoch nicht weiter verunsichern, meint zumindest Maudlin. Tatsächlich sei diese Form der Nichtübereinstimmung bereits aus dem bekannten ‘Auto-Garagen-Problem’ der Speziellen Relativitätstheorie bekannt.

11.9 Das ‘Auto-Garagen’-Beispiel der Relativitätstheorie

Lorentz hielt die von ihm eingeführte relativistische Lorentzkontraktion für einen dynamischen Effekt. Dabei trat jedoch das Problem auf, dass zwischen Beobachtern Inkonsistenzen entstehen, die zu ähnlichen Paradoxien führen wie diejenigen, die wir im EPR-Fall diskutieren. In beiden Fällen muss man sich zurückbesinnen, dass Gleichzeitigkeit ein Begriff ist, der von der gewählten Hyperebene abhängt.

Ein berühmtes Beispiel für eine Beobachterinkonsistenz in der Speziellen Relativitätstheorie ist das ‘Auto-Garagen’-Beispiel. Man stelle sich ein Auto und eine Garage vor. Wenn beide ruhen, haben sie dieselbe Länge. Steigt man

²³*The obvious choice in Minkowski space time is a flat space-like hyperplane.* (Maudlin, S. 201.)

11.9 Das ‘Auto-Garagen’-Beispiel der Relativitätstheorie

nun aber ein und fährt mit relativistischer Geschwindigkeit in die Garage, so erlebt das fahrende Auto, relativ zum Ruhesystem der Garage, eine Kontraktion. Jetzt sollte das Auto folglich voll und ganz in die Garage hineinpassen.

Das Auto jedoch, oder genauer der Fahrer im Auto, erzählt eine andere Geschichte. Die Garage bewegt sich und erfährt eine Verkürzung - folglich ragt das Auto aus der Garage heraus und wird nie ganz hineinpassen, so dass wir plötzlich die Garagentür hinter dem Auto nicht mehr schließen können werden. Wie kann beides der Fall sein, dass das Auto ganz in die Garage passt und dass es gar nicht ganz hinein passt?

Zeichnet man das Problem in ein Minkowski-Diagramm, so sieht man, dass im Bezugssystem der Garage ein Moment existiert, ein Gleichzeitigkeitsschnitt ‘ t =konstant’, in dem das Auto ganz in der Garage ist, wo also Vorder- und Hinterende des Autos in der Garage sind. Aus dem Bezugssystem des Autos heraus existiert jedoch ein Moment (t' =konstant), in dem das Vorderende schon aus der Garage heraus ist, während das Hinterende noch nicht vor der Garage und noch nicht einmal hineingefahren ist.

Jedoch gibt es immer die Möglichkeit, eine Hyperebene gerade so einzuzeichnen, dass das Auto vollständig in der Garage ist. Diese Hyperebene ist nicht bezugssystemabhängig - auf sie können sich alle Bezugssysteme einigen. An diesem Beispiel sieht man, wie scheinbar nichtzeitliche Formulierungen durch versteckte temporale Aussagen beeinflusst und verzerrt werden:

[...]it is not the Lorentz transformation which is generating the contradictions between the [...] stories in the EPR example, but the change in hyperplanes. [...]Therefore if one were to ask for the state of a photon relative to [a certain] hyperplane, all reference frames would give the same answer [...]²⁴

²⁴Maudlin, S. 208.

Die Frage, ob Auto oder Garage länger sind, scheint bei oberflächlicher Betrachtung eine räumliche Frage zu sein. Wäre dies jedoch der Fall, so läge ein Widerspruch, eine echte Inkonsistenz vor. Schaut man jedoch genauer hin, so liegt der Schwerpunkt der Aussage darin, ob Vorder- und Hintere des Autos ‘gleichzeitig’ in der Garage sein können oder nicht, und dieser Begriff der Gleichzeitigkeit ist natürlich relativ und abhängig vom Bezugssystem, von der gewählten Hyperebene. Eine solche raumartige Hyperebene ist nur in einem bestimmten Bezugssystem eine Hyperebene der Gleichzeitigkeit. Die raumartige Hyperebene als solche ist ein lorentzinvariantes Objekt.

11.10 Relativistische Demokratie der Hyperebenen

Zwischen den verschiedenen raumartigen Hyperebenen des EPR-Experiments unterscheiden sich die Aussagen radikal. Tatsächlich können sich die Beobachter verschiedener Ebenen weder auf die Reihenfolge, in der die Teilchen registriert werden (erst rechts, dann links, oder umgekehrt), noch auf den Ort, an dem das stochastische Ereignis und den, an dem das deterministische stattfindet, einigen.

Geben wir uns damit zufrieden, fragt Maudlin, diese beiden unterschiedlichen Aussagen koexistieren zu lassen? Vergleicht man dies mit dem oben beschriebenen relativistischen ‘Auto-Garagen’-Beispiel, in dem zwei Beobachter sich, je nach Bezugssystem, nicht darauf einigen können, ob das Auto ganz in die Garage passt oder nicht, so sehen wir, dass dieselbe Lösung möglich ist: Denn spezifizieren sie, bezüglich welcher Hyperebene sie eine Aussage treffen, werden sie übereinkommen. Analog ist es nicht die Lorentztransformation, die die Widersprüche im EPR-Fall erzeugt, sondern das Wechseln zwischen Hyperebenen der Gleichzeitigkeit.

Die von Maudlin im Folgenden als beste Lösung vorgeschlagene Position ist tatsächlich nicht neu und wurde bereits 1985 von dem Physiker Gordon Fleming²⁵ vorgeschlagen. Nach dieser Theorie sind auch quantenmechanische

²⁵ Fleming, G.: Towards a Lorentz Invariant Quantum Theory of Measurement. In: *Green-*

11.10 Relativistische Demokratie der Hyperebenen

Eigenschaften wie Polarisation stark von der Hyperebene abhängig.

So mache es beispielsweise im EPR-Fall keinen Sinn, von einer Polarisation der Photonen vor dem Detektor zu sprechen -, sondern nur von einer *Polarisation bezüglich einer Hyperebene*, denn in einer Ebene, in der Photon 1 zuerst gemessen wird, besitzt Photon 2 instantan, und dies möglicherweise bereits vor dem Messgerät 2, bereits eine wohldefinierte Polarisation - aber eben nur in dieser speziellen Hyperebene, beziehungsweise den Hyperebenen, in denen ebenfalls Photon 1 zuerst gemessen wird.

Fände jedoch der Kollaps nur entlang einer einzigen Hyperebene statt, so wäre diese ausgezeichnet, denn laut Quantenmechanik soll der Kollaps instantan geschehen, was dann nur in dieser einen Hyperebene der Fall wäre. Fleming schlug daher vor, dass der Kollaps in *allen Hyperebenen instantan* stattfände. Der Kollaps hängt dann nicht mehr von der Hyperebene ab (keine Hyperebene ist ausgezeichnet). In diesem Bild existieren verschiedene Realitäten (verschiedene Wahrheitswerte), je nach betrachteter Hyperebene: Beispielsweise wird sich für ein Bezugssystem, für das eine bestimmte Hyperebene eine Hyperebene der Gleichzeitigkeit repräsentiert, Teilchen 1 als zuerst gemessen darstellen - in einer anderen Hyperebene zeigt sich für ein Bezugssystem, für das diese Hyperebene eine Ebene der Gleichzeitigkeit darstellt, unter Umständen, je nach Lage der Hyperebenen im Minkowskiraum, ein anderes Bild.

Es finden also mit jedem Kollaps immer alle Kollapsvarianten statt: Pro Hyperebene existieren wohldefinierte Wahrheitswerte, die sich jedoch von anderen Hyperebenen unterscheiden. Doch wirft dieses Bild die Frage auf, ob die Natur wirklich so verschwenderisch war, entlang jeder Hyperebene einen Kollaps durchzuführen.

Does it really make sense to say that a photon at a particular location has one polarization state when thought of as lying along one hyperplane and another when thought of as lying on a different one? [...]The original difficulty in picking a hyperplane for wave collapse has been swamped by [...]collapses along an infini-

berger, D. (ed.): New Techniques and Ideas in Quantum Measurement Theory. New York Academy of Sciences, no. 480 (1986), S. 574-575.

11 *Tim Maudlins kausale Kollapsdeutung des EPR-Experiments*

ty of hyperplanes that [like in the EPR case] pass through either detection event.²⁶

Tatsächlich zeigt diese Theorie auch, dass jede Theorie, die die Bellschen Ungleichungen verletzt, nichtlokal und nichtseparabel ist, denn in offensichtlicher Weise verletzt dieses Bild der vielen Hyperebenen vor allem das Prinzip der Separabilität, wonach Objekte ihre Eigenschaften unabhängig vom Rest des Universums besitzen sollen. In diesem Bild sind die Eigenschaften abhängig von einer gesamten Ebene der Gleichzeitigkeit.²⁷ Das Prinzip der Lokalität ist überdies verletzt, da der Kollaps der Wellenfunktion entlang einer Hyperebene instantan stattfindet - über den ganzen Raum hinweg.

Nichtseparabilität in diesem Bild rüttelt an einem weit verbreiteten Verständnis dessen, was Eigenschaften bedeuten. Die Intuition über die intrinsische Natur von Eigenschaften von Objekten beschrieb Einstein, wie in einem 1971 von Max Born veröffentlichten Buch zitiert:

An essential aspect of things in physics is that [at a certain time] they [...][have] an existence independent of one another, provided [they] are ‘situated in different parts of space’. Unless one makes this kind of assumption about the independence of the existence (the ‘being thus’) of objects which are far apart from one another in space [...]physical thinking in the familiar sense would not be possible.²⁸

Eigenschaften sollten, so Einstein, also eine Angelegenheit des physikalischen Zustands der Dinge sein, in einer kleinen Region, in der sich beispielsweise ein Photon aufhält - und unabhängig sein von raumartig entfernten Prozessen und Objekten. Auch von der Wahl gewisser Hyperebenen sollten Ei-

²⁶Maudlin, S. 209.

²⁷Since Fleming’s theory contains wave collapses along spacelike hyperplanes. the polarization state of a photon in this theory is not an intrinsic property, but the photon has a polarization state only as a component of a complete hyperplane(Maudlin, S. 211).

²⁸Born, M.: *The Born-Einstein Letters*. Trans. I. Born, Walker, New York 1971, S. 170.

11.11 Was wäre, wenn es keinen Kollaps gäbe?

genschaften - folgt man Einsteins Intuition - eigentlich unabhängig sein. Eine solche Vorstellung aber scheint, sucht man nach einer relativistischen Quantenmechanik und einer relativistischen Beschreibung des Kollapses, nicht länger haltbar zu sein.

Auffällig ist, wie oben erwähnt, dass in Flemings Theorie die Wahrheitswerte von der Hyperebene abhängen, auf die man sich bezieht. Dies allerdings unterscheidet sich nicht von den Problemen der Speziellen Relativitätstheorie, in der ebenfalls die Aussage ‘das Auto ist vollständig in der Garage’ wahr ist nur in Bezug auf eine bestimmte raumartige Hyperebene. Die Relativität der Wahrheitswerte, wie sie in der von Maudlin propagierten Theorie Flemings auftaucht, ist also im Vergleich mit der Relativitätstheorie zunächst gleichermaßen kontraintuitiv wie erträglich.

Trotzdem tauchen in dieser Deutung auch etwas anders geartete Fälle von Relativität auf: So kann ein Photon, das an einem Schnittpunkt zweier Hyper Ebenen sitzt, in deren einer es eine wohldefinierte Polarisierung besitzt, wohingegen in der anderen nicht - an diesem Kreuzungspunkt sowohl polarisiert als auch nicht polarisiert sein, je nach Hyperebene, auf die man sich bezieht. Die Polarisierung des Photons ist also keine innere Eigenschaft mehr, sondern kann nur als Komponente eines größeren Ganzen verstanden werden, nämlich jeweils einer gesamten Hyperebene: Die Teile sind nicht unabhängig vom Ganzen definierbar. Für die Interpretation des von uns diskutierten EPR-Experiments heißt das, dass die Frage, welches Teilchen den indeterministischen Kollaps durchgeführt hat und an welchem der deterministische Prozess stattfand, sich nicht eindeutig beantworten lässt - sondern nur relativ zu einer Hyperebene spezifizierbar ist.

11.11 Was wäre, wenn es keinen Kollaps gäbe?

Entstehen all die oben beschriebenen Probleme nur, weil wir uns in einer quantenmechanischen Interpretation befinden, die einen Kollaps postuliert? Maudlin meint, dass dem nicht so sei, denn wenngleich mit der Flemingschen Theorie eine lorentzinvariante Formulierung einer Kollapstheorie gelinge, an der beispielsweise die Kopenhagener Deutung scheitert, so existierten auch Beispiele

11 Tim Maudlins kausale Kollapsdeutung des EPR-Experiments

von Nichtkollapstheorien, die die Lorentzinvarianz verletzen, wie beispielsweise die Bohmsche Quantenmechanik. Wie wir in Kapitel 12 sehen werden, ist Bohms Interpretation des Quantenformalismus deterministisch. Dennoch kann das Verhalten der EPR-Photonen nicht allein aus dem Anfangszustand und dem Aufbau der Messapparate erschlossen werden. Mindestens eins der Photonen wird auch durch ein entferntes Messgerät beeinflusst, da sonst die Bell-Ungleichungen nicht verletzt würden: "So at least one photon's behavior must be determined not only by the initial state and the setting of its own polarizer, but also by the setting of the distant polarizer."²⁹

Nur in einer nichtrelativistischen Theorie ist jedoch klar, wann dieser Einfluss durch einen entfernten Polarisator 'geschieht'. Denn dort heißt es: Das Photon, das zuerst gemessen wird, beeinflusst instantan das zweite Photon - dieses Messgerät also ist für den Zustand des entfernten Photons im Augenblick der Messung des ersten Photons beeinflussend für den Zustand dieses entfernten Photons.

Der Status eines Messgerätes, ob er ein entferntes Photon beeinflusst oder nicht, hängt also davon ab, ob das 'erste' Photon des korrelierten Paares an ihm gemessen wird oder nicht. Es scheint also, als wäre nicht der Kollaps an sich das Problem, sondern eher die nichtlokale Abhängigkeit eines Messergebnisses von einem weit entfernten anderen Messgerät.

11.12 Verwerfen der Wertedefiniertheit: Many Minds

Es hat sich in der vorangehenden Analyse gezeigt, dass jede relativistische Theorie des EPR-Experiments nichtlokaler Abhängigkeiten zwischen Messergebnissen bedarf. Da Maudlin das Kriterium der Lokalität in physikalischen Theorien als wesentlich wertet und es durchaus als einen Mangel der Flemingischen Theorie ansieht, dass diese der Nichtlokalität bedarf, entscheidet er sich an dieser Stelle für eine Non-Kollaps-Theorie, die seiner Meinung nach eine lokale Interpretation ohne Überlichtkausalität erlaubt.

²⁹Maudlin, S. 213.

11.12 Verwerfen der Wertedefiniiertheit: Many Minds

The underlying problem for a relativistic theory, then, is not wave collapse per se, but rather the non-local dependence of one measurement result on [a] distant setting. In collapse theories that dependence is secured through the collapse; in Bohm's theory it is mediated through the uncollapsed wave-function ...³⁰

Nachdem sich herausgestellt hat, dass das von uns eingangs als Bündelkriterium für wissenschaftliches Verstehen aufgeführte Prinzip der Lokalität im Rahmen kausal-prozessuraler quantenmechanischer Deutungen des Kollapses nicht befriedigend berücksichtigt werden kann, weist Maudlin auf eine Theorie hin, die keine Probleme mit Lorentzinvarianz hat, weil sie vollständig lokal formulierbar ist:

There is, however, one non-collapse theory, which runs into no difficulties at all with Lorentz invariance. Indeed, the theory is completely consistent with any conceivable relativistic constraint because it is a completely local theory. There is no sort of non-local, superluminal action or influence at all.³¹

Tatsächlich scheint es, als müsse man sich beim derzeitigen Stand der physikalischen Forschung entscheiden, Lorentzinvarianz aufzugeben und sich mit der Flemingschen Hyperebenentheorie zufriedenzugeben, oder Maudlins nun vorgestellter Theorie folgen, die die physikalischen Prinzipien erfüllt, jedoch möglicherweise dem Leser aus anderen Gründen keinesfalls zusagen mag. Um zu einer kausalen Interpretation zu gelangen, schlägt Maudlin an dieser Stelle vor, nicht länger von wohldefinierten Ergebnissen von Messungen zu sprechen. Er verwirft also die Wertedefiniiertheit der Messergebnisse.

Die Quantenmechanik könne letztlich nicht beschreiben, wodurch der Kollaps der Wellenfunktion ausgelöst werde, argumentiert Maudlin:

³⁰Maudlin, S. 214.

³¹Maudlin, S. 216.

11 Tim Maudlins kausale Kollapsdeutung des EPR-Experiments

We have already seen that the collapse of the wave-function, although central to the orthodox interpretation of quantum mechanics, is grafted on to the formalism of the theory in a completely ad hoc way. The orthodox theory has no precise characterization of how and when wave-function collapse occurs.³²

Tatsächlich scheint der Kollaps mit Messungen assoziiert zu sein, dennoch existiert keine vollständige Theorie des Messprozesses, der den Kollaps als physikalischen und möglicherweise kausalen Prozess beinhaltet. Ohne Kollaps erreicht das Photon den Polarisator mit undefinierter Polarisation. Laut der Schrödingergleichung müsste der Messapparat in diese Indefiniertheit mit einbezogen werden. Die Wellenfunktion des Detektors müsste sich also in eine Superposition zweier Zustände entwickeln, einen, in dem das Photon absorbiert wurde, und einen, in dem es durchgelassen wurde. Die orthodoxe Interpretation verneint jedoch, dass dies geschieht und behauptet, dass die schrödingersche Entwicklung irgendwo zusammenbricht. Dieser Interpretation zu folgen, führt aber zu weitreichenden Problemen, wie zuvor argumentiert.

Akzeptiert man hingegen eine Deutung, die ohne Kollaps auskommt, trifft man auf andere tiefgreifende Probleme. Das nächstliegende ist, dass wir keine Welt beobachten, in der das Photon sowohl durch den Detektor geht als auch absorbiert wird. Ein solcher Widerspruch lässt sich jedoch für Maudlin - und dies ist sein Lösungsvorschlag - mit Hilfe der umstrittenen "Many-Minds-Interpretation der Quantenmechanik" auflösen, die David Albert und Barry Loewer³³ 1988 und 1989 entwickelt haben. Darin heißt es, dass Detektoren in der Tat in einem Überlagerungszustand bleiben und auch die Beobachter in einen solchen geraten. Nur ihr Bewusstsein (*Mind*) gerate nicht in einen solchen Überlagerungszustand.

³²Maudlin, S. 217.

³³Siehe hierzu *Albert, D. und Loewer, B.: Interpreting the Many-Worlds Interpretation. Synthese 77 (1988), S. 195-213.*

Albert, D. und Loewer, B.: Two Non-Collapse Interpretations of Quantum Mechanics. Nous 12 (1989), S. 121-138.

11.12 Verwerfen der Wertedefiniertheit: Many Minds

Albert and Loewer postulate that minds are never in superpositions of different belief states. So if your body manages to get into a superposition of seeing the detector fire and not seeing it fire, your mind will nonetheless either experience it as firing or not firing,[...].³⁴

Es gäbe eine stochastische Verbindung zwischen Körper und Geist, so Albert und Loewer. Das Gehirn biete dem Geist verschiedene Möglichkeiten einer Superposition an, und der Geist wähle eine, statistisch. Ferner aber existiere nicht nur ein Geist, sondern in jedem Menschen unendlich viele Geister, die in vielen verschiedenen Zuständen existieren.

Wertedefiniertheit tritt nur im Geist ein, und auch Korrelationen von Messergebnissen existieren nur im Geist, so die Many-Minds-Theorie, und eben dies löse in einfacher Weise das Problem nichtlokaler Prozesse. Da es keine physikalisch-beobachterunabhängigen Korrelationen zwischen raumartig entfernten Ereignissen gibt, löst diese Interpretation das Problem der Nichtlokalität.

Bezogen auf das EPR-Experiment muss man sich die Situation demnach so vorstellen: Ohne Beobachter geraten die beiden Polarisatoren nach Passage der Photonen in eine Überlagerung aus allen möglichen Ergebnissen. Die Korrelation in der Wellenfunktion bleibt bestehen, es gibt jedoch keine wohldefinierten Ergebnisse. Betritt ein Beobachter die Szene, so gerät sein Körper in einen Überlagerungszustand, nur sein Geist sieht ein definitives Resultat. Dabei *geschieht* nichts am entfernten Detektor. Die Tatsache, dass der Beobachter das Photon gesehen hat, führt zu keinem Kollaps.

Geht der Beobachter zum entfernten Detektor hinüber, dann gibt es, da die Korrelation in der Wellenfunktion existiert, einfach keine Wahrscheinlichkeit dafür, ein unkorreliertes Ereignis zu beobachten. Der Geist des Beobachters wird die Detektoren als korrelierte Ergebnisse gebend feststellen. Allerdings muss er dafür mit beiden Detektoren interagieren. Da jede dieser Interaktionen

³⁴Maudlin, S. 218.

11 Tim Maudlins kausale Kollapsdeutung des EPR-Experiments

ein rein *lokaler* Prozess ist, bedarf es keiner Überlichteinflüsse.

Deswegen könne folglich der Beobachter nur ein korreliertes Resultat feststellen. Jede Interaktion des Beobachters mit dem Gerät sei eine lokale Interaktion, es gebe kein nichtlokales Ereignis.

Interagieren hingegen zwei Beobachter (statt zweier Geister), so interagieren sie stets nur über ihre Körper. Hat sich der Geist eines Beobachters für ein definiertes Ereignis entschieden, beobachtet er beispielsweise, dass das Photon durch den Spalt geht, und fragt er einen anderen Beobachter, was dieser gesehen habe, so wird der Geist des ersten Beobachters wahrnehmen, dass der andere sagt, auch er habe das Photon hindurchgehen gesehen - auch wenn der zweite Beobachter selbst in einer Superposition existiert und agiert, der erste Beobachter befindet sich in jenem Zweig, in dem das Photon passiert ist, und nimmt daher nur eine kohärente Antwort des zweiten Beobachters wahr. Die Lösung liegt darin, dass nur die Körper und nicht die tatsächlichen Bewusstseine (Minds) interagieren.

Es kann also beispielsweise auch geschehen, dass ein Beobachter ein bestimmtes Resultat wahrnimmt, während der andere ein unkorreliertes Ergebnis beobachtet. Dies scheint der Quantenmechanik zu widersprechen. Bis zu diesem Punkt aber ist noch keine Korrelation beobachtet worden. Um dieses scheinbare Paradoxon aufzulösen, muss der Many-Minds-Anhänger nun zu einem Postulat greifen, das auch Maudlin nicht weiter motiviert: Dass nämlich *stets nur die Körper, nie aber die Bewusstseine interagieren.*

Tatsächlich ist dieses Postulat im System der Many-Minds-Theorie notwendig. Würde nämlich der Geist (das Bewusstsein) eines Beobachters mit dem Körper eines anderen Beobachters interagieren, so würden beide in einen Überlagerungszustand geraten. Daher können nur Bewusstseine miteinander interagieren.

Wenn also der eine Beobachter das Photon durch den Polarisator fliegen sieht und seinen Kollegen nach dessen Beobachtung befragt, so wird er die Antwort wahrnehmen als 'Ich sah mein Photon hindurchgehen' - also als korreliert mit der eigenen Beobachtung. Auch der andere Beobachter wird eine solche korrelierte Antwort registrieren. In jedem individuellen Geist sind also - laut Many-Minds-Interpretation - die quantenmechanischen Korrelationen

11.13 Kritik an der 'Many-Minds'-Theorie

erhalten, wenngleich sich die Sichtweisen in unterschiedlichen Geistern unterscheiden können.

Der Vorteil dieser Non-Kollaps-Theorie gegenüber der zuvor diskutierten Kollaps-Theorien sei, dass letztere eine Hyperebenen-Abhängigkeit benötigten, deren ontologischer Status noch nicht weiter definiert sei. Die Many-Minds-Ontologie hingegen komme ohne Kollaps aus, bringe aber einen hohen Preis mit sich, da man an die Many Minds glauben müsse.

11.13 Kritik an der 'Many-Minds'-Theorie

Am Ende seiner Analyse war Tim Maudlin zu dem Schluss gekommen, dass eine 'Many Minds'-Interpretation einige der zuvor erwähnten Probleme seiner Hyperebenenendeutung lösen könnte. Dies ist nach Meinung der Autorin jedoch höchst kritisch zu bewerten. Mit der Many-Minds-Interpretation geht eine große Zahl unmotivierter Postulate einher. Es bleibt beispielsweise unklar, warum Körper und Geist unterschiedlich auf die Superposition reagieren sollten. Der Zusammenhang zwischen Geist und Körper, der für den Many-Minds-Ansatz so zentral ist, bleibt völlig undefiniert.

Auch scheint es nicht der Fall zu sein, dass man auf der Suche nach einer physikalisch-kausalen Erklärung des EPR-Experiments unausweichlich zur Many-Minds-Interpretation gelangt. Eine noch nicht ganz zufriedenstellende Theorie wie die Flemingsche Hyperebenen-Theorie durch eine Anzahl nahezu unmotivierter Postulate zu ersetzen, ist in Hinblick auf unsere eingangs gegebene Definition von Verstehen eine zweifelhafte Lösung. Der entscheidende Übergang zwischen Superposition und wohldefiniertem Eigenzustand wird in einer solchen Deutung nicht erklärt - sondern einfach in die Körper-Bewusstseins-Grenze verschoben.

Mit der Many-Minds-Deutung umgeht man zwar das Problem der Nichtlokalität, es tauchen dafür aber verschiedene andere Probleme auf, unter denen das Paradoxon von *Wigners Freund* den wohl prominentesten Einwand gegen die Theorie verkörpert. Dieses Paradoxon stellt eine Erweiterung des Gedankenexperimentes von 'Schrödingers Katze' dar und wurde von Eugene P.

11 *Tim Maudlins kausale Kollapsdeutung des EPR-Experiments*

Wigner als Beispiel für das Messproblem der Quantenmechanik formuliert.³⁵

In diesem Gedankenexperiment wird ein Beobachter, Wigner, mit einer Messapparatur in einem Zimmer eingeschlossen. Laut Kopenhagener Deutung entsteht erst dann ein wohldefiniertes Ergebnis, ein kollabierter Zustand, wenn eine Messung stattfindet. Doch wie kann eine Messung definiert werden? Genügt schon ein Messgerät, oder bedarf es eines menschlichen (bewussten) Beobachters? Würde dieser Beobachter nicht erst dann selbst wohldefiniert, wenn er wiederum von außen von einem weiteren Beobachter beobachtet würde - eben von Wigners Freund? Eine unendliche Kette, ein *infiniter Regress*, entsteht, und die Lösung wird verschoben.

Eine eben solche Verschiebung des wohldefinierten Zustands liegt auch im Falle der *Many-Minds-Theorie* vor: Dort wird der Augenblick der Entstehung eines wohldefinierten Zustandes in jene Region verschoben, die wir bislang nicht genauer auflösen können, eben die Grenze zwischen Geist und Körper. Ein wenig verstandenes System ersetzt somit einen anderen wenig verstandenen Zusammenhang.

Dabei werden keine zusätzlichen der von uns eingangs erwähnten Kriterien κ_i erfüllt. Möglicherweise hätte man ein besseres Verständnis erst dann erreicht, wenn man das menschliche Bewusstsein und seinen Zusammenhang mit dem Körper physikalistisch-kausal erklären kann - doch scheinen wir davon bislang noch weit entfernt zu sein. Wir wollen aufgrund obiger Kritik die *Many-Minds-Interpretation* von Maudlin außer Acht lassen und nur seinen *Hyperebenenansatz* analysieren.

³⁵ *Wigner*, E. P.: Remarks on the Mind-Body Question. In: I. J. Good (ed.): *The Scientist Speculates: An Anthology of Partly-baked Ideas*. American Journal of Physics, Vol. 32, Issue 4 (1964), S. 284-302.

11.14 Zusammenfassung

Wie wir gesehen haben, bemüht sich Tim Maudlin um eine *physikalisch-prozessurale Deutung des Kollapses der Wellenfunktion*. Die Diskussion dieses Ansatzes ergab, dass die *Flemingsche Hyperebenentheorie* eine der wenigen Möglichkeiten darstellt, eine kausal-prozessurale Kollapsdeutung der Quantenmechanik *lorentzinvariant* zu formulieren und somit die Spezielle Relativitätstheorie mit dem EPR-Experiment zu verbinden.

Bei der Untersuchung des quantenmechanischen Kollapses hat Tim Maudlin dafür plädiert, dass der Kollaps einen *physikalischen Prozess* darstellt, der *kausal* sein muss, aber nicht die Schranke der Lichtgeschwindigkeit einhalten kann. Hielte er sich an diese Grenze, so könne man die Korrelationen zwischen den Messergebnissen über raumartige Distanzen hinweg nicht erklären. Überschreitet er als kausaler Prozess jedoch die Lichtgeschwindigkeitsgrenze, so treten - wenn man nicht Flemings Position vertritt - Probleme mit der Relativitätstheorie, und genauer: mit der Lorentzinvarianz auf, denn wenn der Kollaps durch die Messung an einem Teilchen induziert wird und sich damit *instantan* auch die Superposition am anderen Teilchen hin zu einem Eigenzustand verändert, der in seinem Eigenwert mit dem zweiten Teilchen korreliert ist -, so muss die Frage gestellt werden, was in einer lorentzinvarianten Theorie unter dem Begriff der ‘Gleichzeitigkeit’ verstanden werden kann.

Gleichzeitigkeit ist in der Relativitätstheorie vom Bezugssystem abhängig. Verschiedene zueinander bewegte Beobachter beschreiben Prozesse beispielsweise als in umgekehrter Reihenfolge stattfindend. So würden sich auch im EPR-Experiment zwei Beobachter nicht einigen können, welches der Teilchen als erstes gemessen worden sei, an welchem also der indeterministische Prozess des Kollapses induziert wurde und an welchem der korrelierte, deterministische Auswahlprozess eines Eigenvektors stattgefunden hat. Diese Form der Nichtübereinstimmung von Geschichten vergleicht Maudlin mit dem Auto-Garagen-Beispiel der Speziellen Relativitätstheorie, bei dem ebenfalls bezugssystemabhängig einmal das relativistisch schnelle Auto ganz in die Garage zu passen scheint und einmal nicht.

In Analogie mit der Relativitätstheorie entscheidet sich Maudlin dafür, zu

11 Tim Maudlins kausale Kollapsdeutung des EPR-Experiments

akzeptieren, dass verschiedene Bezugssysteme der Beobachtung verschiedene *Wahrheitswerte* zuordnen. Beziehen sich die Beobachter jedoch auf raumartige Hyperebenen - wie beispielsweise auf jene Hyperebene, die so gewählt werden kann, dass beide Autoenden in der Garage sind - so können sie sich auf eine Geschichte einigen.

Dieses Prinzip wird von Gordon Fleming und Tim Maudlin verwendet, um eine *lorentzinvariante Theorie des Kollapses* zu formulieren. Dabei geht man von einem instantanen Kollaps in *jeder raumartigen Hyperebene* aus. Bezüglich jeder Hyperebene kann also spezifiziert werden, wo der indeterministische und wo der deterministische Prozess der Messung stattfand.

Das Problem, das dabei verbleibt, ist, dass ein entlang jeder Hyperebene stattfindender Kollaps sowohl das Prinzip der *Separabilität*, als auch das Prinzip der *Lokalität* verletzt. Ersteres, da die Eigenschaften eines Teilchens - ob es bereits gemessen wurde und kollabiert ist und somit einen wohldefinierten Wert in der Messobservablen angenommen hat - von der Hyperebene und somit von einem Schnitt durch die Raumzeit abhängt. Das Prinzip der Lokalität andererseits ist verletzt, da der Kollaps in der Hyperebene instantan auch über raumartige Distanzen hinweg stattfindet.

Maudlin empfindet diese Unklassizitäten und insbesondere die mangelnde Lokalität (die wenigstens in der Kopenhagener Deutung erhalten werden können) letztlich als fatal für die kausale Theorie des Kollapses und entscheidet sich deswegen in letzter Konsequenz für die Many-Minds-Theorie, in der der Kollaps nur im Bewusstsein stattfindet - also lokal. Die Probleme der Many-Minds-Theorie sind jedoch mindestens genauso unklassisch wie die des Flemingschen Ansatzes. Es scheint, als müsse auch hier ein weiterer Geist den Geist eines anderen beobachten, um einen Kollaps herbeizuführen, wodurch das bekannte Problem von Wigners Freund auftritt. Da unbekannt ist, wie genau Geist und Körper zusammenhängen, ist auch unklar, wie man einen nur im Geist stattfindenden Kollaps rechtfertigen sollte.

Inwiefern die Maudlinsche (Flemingsche) Interpretation der Quantenmechanik für wissenschaftliches Verstehen hilfreich ist, wird in Kapitel 13.4 auf Seite 224 im Vergleich mit der Bohmschen Deutung diskutiert.

12 Bohms kausale Non-Kollaps-Deutung

12.1 Die de Broglie-Bohm-Theorie

Die Bohmsche Interpretation der Quantenmechanik, die auch de Broglie-Bohm-Theorie oder passenderweise die kausale Interpretation der Quantenmechanik genannt wird, entstand in den späten 1920er Jahren mit einer Veröffentlichung von Louis de Broglie¹ und wurde in den 50er Jahren von David Bohm² erweitert und einer breiteren Öffentlichkeit zugänglich gemacht.

Die Bohmsche Interpretation ist eine Versteckte-Variablen-Theorie, in der die Wellenfunktion ψ einen stärkeren Realitätsstatus einnimmt als beispielsweise in Bohrs Kopenhagener Interpretation. In der bohmschen Theorie existiert die Wellenfunktion zumindest insofern ‘physikalisch’, als sie eine tatsächliche, in ihrer Wirkung beobachtbare Kraft auf ein Punktteilchen ausüben kann. Sie wird deswegen als *Führungsfeld* bezeichnet. In dieser Interpretation stellt die Wellenfunktion in gewisser Weise eine von zwei fundamentalen Komponenten der ‘Realität’ dar. Die zweite Komponente sind Teilchen, die anders als in der Kopenhagener Deutung zu jedem Zeitpunkt in ihren Ortskoordinaten wohldefiniert sind.

Während die Schrödingergleichung die Entwicklung des Führungsfeldes ψ beschreibt, lässt sich für die Teilchen aus der Schrödingergleichung eine so genannte *Führungsgleichung* ableiten (siehe Gleichung 12.4, Seite 197), in die

¹de Broglie, L.: La Mécanique ondulatoire et la structure atomique de la matière et du rayonnement. In: Journal de Physique, Serie VI. VIII, Nr. 5 (1927), S. 225-241.

²Bohm, D.: A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of ‘Hidden’ Variables. In: Physical Review. 85, Nr. 2 (1952), S. 166-179.

12 Bohms kausale Non-Kollaps-Deutung

die durch ψ auf das Teilchen einwirkende Kraft funktional eingeht.

In der bohmschen Mechanik bewegen sich die Teilchen daher in deterministischer Weise, denn sie folgen der auf sie durch das ψ -Feld einwirkenden Kraft, während ψ sich deterministisch nach der Schrödingergleichung entwickelt. Das bedeutet beispielsweise, dass derjenige der zwei Spalten im Doppelspaltexperiment, durch den ein Teilchen hindurchgeht, genauso festgelegt und eindeutig ist wie der Ort auf dem Schirm, an dem das Punktteilchen ankommt. Das Beugungsbild entsteht ausschließlich durch das Verhalten der Wellenfunktion ψ .

Kritiker der bohmschen Theorie bemängeln, dass die Theorie noch nicht zufriedenstellend auf die relativistische Quantenmechanik ausgedehnt werden konnte. Es gibt jedoch erfolgreiche Ansätze wie beispielsweise Peter Hollands "A Quantum Theory of Motion"³, in dem die relativistische Klein-Gordon-Gleichung bereits auf bohmsche Weise interpretiert wird, so dass die Vermutung, eine solche relativistische Verallgemeinerung sei prinzipiell ausgeschlossen, an Boden verliert.

Von Beginn der bohmschen Formulierung an besaß die Theorie Erwin Schrödingers Zustimmung, denn als Vater der Wellenfunktion schien die Bohmsche Interpretation endlich eine Erklärung zu liefern für ein Problem, das ihn seit den Kindertagen der Quantentheorie plagte. In einer 1935 erschienenen Veröffentlichung mit dem berühmten Titel "Die gegenwärtige Situation der Quantenmechanik"⁴ beschrieb Schrödinger das Problem folgendermaßen:

[Im radioaktiven Zerfall] wird das entstehende Teilchen als sphärische Welle beschrieben, die einen kugelförmig um das zerfallende Atom angebrachten Schirm gleichmäßig erfüllt. Der Schirm zeigt dann jedoch nicht einen uniform leuchtenden Schein, sondern wird in einem Augenblick an einer Stelle erhellt [...]

Dieses Problem eines sich als Kugelwelle fortbewegenden Teilchens, das

³Holland, P.: A Quantum Theory of Motion. Cambridge University Press, Cambridge 1995.

⁴Schrödinger, E.: Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik. Naturwissenschaften 23 (1935), S. 807-812, 823-828, 844-849.

12.2 Wurden verborgene Parameter nicht widerlegt?

jedoch als Punktteilchen registriert wird, beschäftigte auch Albert Einstein. Deswegen war auch er der Bohmschen Interpretation nicht ganz fern. Beispielsweise beschrieb er 1949, wie eine Punktteilchendeutung der Quantenmechanik verstanden werden könnte: "Die statistische Quantentheorie würde [dann] eine etwa analoge Position zur statistischen Mechanik einnehmen, im Rahmen der klassischen Mechanik."⁵

Über die Tatsache, dass der statistische Charakter der Quantentheorie aus der Unvollständigkeit derselben folge - jene Unvollständigkeit, die Bohm mit Hilfe der allzeit wohldefinierten Ortskoordinate zu beheben versuchte - schrieb Einstein:

I am firmly convinced that the essentially statistical character of contemporary quantum theory is solely to be ascribed to the fact that this theory operates with an incomplete description of physical systems.⁶

Dass die Bohmsche Theorie anstrebt, die Quantentheorie als eine möglichst klassisch-statistische Theorie aufzufassen, soll im Folgenden gezeigt werden.

12.2 Wurden verborgene Parameter nicht widerlegt?

Bevor Details der Bohmschen Deutung diskutiert werden, soll jedoch kurz die Frage aufgeworfen werden, ob die Bohmsche Theorie nicht längst widerlegt sein sollte. Immerhin hatte John von Neumann 1932 gezeigt⁷, dass nur eine statistische Interpretation der Quantenmechanik möglich und eine Formulierung der Quantenmechanik mit Hilfe verborgener Parameter nicht möglich sei.

⁵*Einstein, A.*: Reply to Criticisms. In: *Schilpp, P.* (ed.): *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*. Tudor Publishing Co., London 1949.

⁶*Pauli, W., Von Meyenn, K.*: *Scientific Correspondence With Bohr, Einstein, Heisenberg, A. O.: 1940-1949*. Springer, Berlin/Heidelberg/New York 1993, S. 643.

⁷*Neumann, von J.*: *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*. Princeton University Press, Princeton 1932.

12 Bohms kausale Non-Kollaps-Deutung

Die Bohmsche Mechanik stellt jedoch ein Gegenbeispiel dazu dar - schließlich ist sie manifest als Verborgene-Variablen-Theorie formuliert, wobei die Ortsvariable die allzeit wohldefinierte und, da im Formalismus nicht als explizit allzeit wohldefiniert vorkommende, ‘verborgene’ Variable darstellt.

John Bell gehörte von Anfang an zu jenen, die von Neumanns Beweis in seiner Reichweite anzweifelten. Grundlage für seine Zweifel war eine Kritik an den von von Neumann verwendeten Annahmen über die verborgenen Variablen. Wenngleich Bell seine berühmten Bellschen Ungleichungen aufstellen sollte, die vielen lange Zeit als Gegenbeweis versteckter Variablen galten, war er doch nie ein Gegner dieser Theorien. Tatsächlich hat er bis zuletzt die Bohmsche Theorie unterstützt und sich über deren Unbeliebtheit verwundert. 1987 schrieb er:

But in 1952 I saw the impossible done. It was in papers by David Bohm. Bohm showed explicitly how parameters could indeed be introduced, into nonrelativistic wave mechanics, with the help of which the indeterministic description could be transformed into a *deterministic* [Kursivschreibung durch die Autorin] one. More importantly, in my opinion, the *subjectivity* of the orthodox version, the necessary reference to the observer, could be eliminated. [...] But why then had Born not told me of this pilot wave [d.h. Führungsfeld]? If only to point out what was wrong with it? Why did von Neumann not consider it? More extraordinarily, why did people go on producing ‘impossibility’ proofs, after 1952, and as recently as 1978? [...] Why is the pilot wave picture ignored in text books? Should it not be taught, not as the only way, but as an antidote to the prevailing complacency? To show us that vagueness, subjectivity, and indeterminism, are not forced on us by experimental facts, but by deliberate theoretical choice?⁸

Was Bell tatsächlich zeigte, war nicht die Unmöglichkeit verborgener Va-

⁸Bell, J.: *Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics*. Cambridge University Press, Cambridge 1987, S. 160.

12.2 Wurden verborgene Parameter nicht widerlegt?

riabler als solcher - sondern nur die Unmöglichkeit lokaler(!) Verborgener-Variablen-Theorien. 1964 bewies er in seinem berühmten Paper "On the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox"⁹, in dem die Bellschen Ungleichungen aufgestellt wurden, dass die Quantenmechanik sogar in jedem Fall nichtlokal sein muss.

Mehr noch als die Unmöglichkeit lokaler Verborgener-Variablen-Theorien zeigte Bell, dass alle Quantenphänomene nichtlokal sein müssen. In seinem Buch "Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics"¹⁰ erläutert Bell, was seine eigenen Ungleichungen über das EPR-Phänomen aussagen. Für Bell existiert gerade im EPR-Fall ein explizit kausaler Mechanismus, der dafür sorgt, dass die Ausrichtung eines Messapparats eine weit entfernte Messapparatur beeinflusst. Tatsächlich folgert Bell, dass das EPR-Experiment beweist, dass zwischen den beiden Messapparaten ein nichtlokaler, kausaler Einfluss bestehen muss, wenn man nicht von einer Vorherbestimmung der Messergebnisse ausgehen möchte:

Let me summarize once again the logic that leads to the impasse. The EPR correlations are such that the *result* [Kursivschreibung durch die Autorin] of the experiment on one side *immediately foretells* that on the other, whenever the analyzers happen to be parallel. If we do not accept the intervention on one side as a *causal influence* on the other, we seem obliged to admit that the results on both sides are *determined in advance* anyway, independently of the intervention on the other side, by signals from the source and by the local magnet setting. But this has implications for non-parallel settings which conflict with those of quantum mechanics. So we cannot dismiss intervention on one side as a *causal* influence on the other.

In welcher Form diese kausale Verbindung physikalisch realisiert sein könnte, dazu hat Bell sich jedoch nie genauer geäußert.

⁹ Bell, J.: On the Einstein Podolsky Rosen paradox. Physics 1, Nr. 3 (1964).

¹⁰ Bell, J.: Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics (Collected papers on quantum philosophy). Cambridge University Press, Cambridge 1987.

12.3 Formalismus der bohmschen Quantenmechanik

Die Bohmsche Quantenmechanik ist mit der Kopenhagener Deutung empirisch äquivalent, da sie dieselben Vorhersagen macht. Überdies verwendet sie im Grunde denselben Formalismus wie die klassische Quantenmechanik. Auch hier stehen die Wellenfunktion und ihre Bewegungsgleichung, die Schrödingergleichung, im Zentrum.

Da aber der Wellenfunktion in der bohmschen Deutung eine physikalische Realität zugesprochen wird, soll sie keine komplexe Funktion sein, sondern ein reelles (physikalisches) Feld. Mathematisch erreicht man dies über eine Äquivalenzumformung, in der man ψ als Summe zweier reeller Felder ψ_1 und ψ_2 auffasst und bestimmte Randbedingungen festlegt. Spricht man also in der bohmschen Quantenmechanik von der Wellenfunktion ψ , so sind damit immer die beiden reellen Felder ψ_1 und ψ_2 gemeint. Es gilt also:

$$\psi = \psi_1 + i\psi_2, \quad (12.1)$$

wobei ferner die Wellenfunktion in Polardarstellung ausgedrückt wird als

$$\psi = R\cos(S/\hbar) + iR\sin(S/\hbar) = Re^{iS/\hbar}, \quad (12.2)$$

wobei $R(x, t)$ eine reelle Funktion ist (Amplitude) und $S(x, t)$ eine reelle Phase. ψ ist noch immer eine Wellenfunktion in dem Sinne, dass sie kontinuierlich ist und das lineare Superpositionsprinzip erfüllt. ψ erfüllt überdies auch die Schrödingergleichung.

Setzt man den Ansatz für ψ ein und teilt man die Schrödingergleichung und die Definition von ψ in einen Real- und einen Imaginärteil, dann erhält man zwei Gleichungen für R und S . Man kann zeigen, dass diese mathematisch äquivalent sind zur Schrödingergleichung der klassischen Quantenmechanik.

Im weiteren postuliert die Bohmsche Interpretation nun, dass ein *physikalisches System* immer sowohl aus der *Wellenfunktion* ψ als auch aus einem *Punktteilchen* besteht, dass zu jeder Zeit einen definierten Ort x und eine Masse m besitzt. Wir werden im Folgenden zeigen, dass ψ eine Kraft auf das

12.3 Formalismus der bohmschen Quantenmechanik

Punktteilchen ausübt. Deswegen unter anderem betrachtet man beide als ein gemeinsames System.

Betrachtet man eine der beiden Gleichungen für die Parameter R und S , sieht man, dass eine der beiden Gleichungen der Hamilton-Jacobi-Gleichung der klassischen Mechanik äquivalent ist - bis auf einen Potentialterm. Die klassische Hamilton-Jacobi-Gleichung lautet nämlich:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{(\nabla S)^2}{2m} + V = 0, \quad (12.3)$$

wobei S die sog. Wirkung ist. Die Bewegungsgleichung der bohmschen Mechanik (die ‘*Führungsgleichung*’) lautet nun:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{(\nabla S)^2}{2m} - \frac{\hbar^2}{2m} \frac{\nabla^2 R}{R} + V = 0. \quad (12.4)$$

Der neue Term

$$Q(x, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\nabla^2 R}{R} \quad (12.5)$$

wird das *Quantenpotential* genannt.

Diesem Quantenpotential hat David Bohm eine objektive Realität zugeschrieben. Er sah darin mehr als eine mathematische Hilfsgröße: Unter dem Einfluss von Q verändern sich die Geschwindigkeiten und Pfade der Teilchen in deterministischer, nicht-stochastischer und beobachtbarer Weise. Dennoch muss Q nicht unbedingt postuliert werden. Man kann die Formulierung umgehen und immer noch die Bohmsche Interpretation beibehalten. Darauf werden wir bald zurückkommen.

Für makroskopische Objekte gilt in dieser Deutung zunächst dieselbe Bewegungsgleichung wie für Quantenobjekte, nur ist in der makroskopischen Dimension das Quantenpotential weniger ‘spürbar’, weswegen wir diesen Term vernachlässigen und auf die klassische Hamilton-Jakobi-Gleichung zurückgreifen können. Somit ist in der bohmschen Quantenmechanik der Übergang zwischen klassischer und quantenmechanischer Beschreibung an den Einfluss von Q gebunden. Q ist jedoch, anders als ein klassisches Potential V , kein unabhängiges externes Potential. Es hängt vom Zustand des Gesamtsystems ab.

Im Rahmen der bohmschen Deutung lässt sich ferner eine so genannte *Geschwindigkeitsgleichung* für ein einzelnes Punktteilchen formulieren. Die Wellenfunktion ψ lässt uns dabei auch die Geschwindigkeit eines Teilchens genau

12 Bohms kausale Non-Kollaps-Deutung

angeben. Setzen wir ψ an als

$$\psi = Re^{\frac{iS}{\hbar}}, \quad (12.6)$$

wobei $R(x, t)$ eine reelle Funktion ist (Amplitude) und $S(x, t)$ eine reelle Phase, so lässt sich für v mit Hilfe von ψ folgende Gleichung motivieren:

$$v = \frac{1}{m} \nabla S(x, t), \quad (12.7)$$

wobei m die Masse des Teilchens darstellt und S ein Phasenfaktor ist. Ein Punktteilchen bewegt sich dabei, wie eingangs hergeleitet, unter dem Einfluss der klassischen Felder - aber auch eines zusätzlichen Quantenpotentials

$$U = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\nabla^2 R}{R}. \quad (12.8)$$

Das Feld ψ selbst befindet sich in rapider Fluktuation, so dass die in der Quantenmechanik verwendete Funktion ψ etwas wie den Mittelwert des Feldes darstellt über einem Zeitintervall, das lang sein muss gegenüber den mittleren Fluktuationsperioden. Die Fluktuationen von ψ lassen sich verstehen als aus einem tieferen Niveau kommend, so dass man sie mit der Brownschen Bewegung in Analogie setzen kann.

Mit diesen Annahmen beschreibt die Bohmsche Theorie das Teilchen als determiniert in seiner Bewegung durch die mittleren Fluktuationen des ψ -Feldes. Die Voraussagen stimmen, wie erwähnt, mit allen Voraussagen der klassischen Quantenmechanik überein und machen die Kopenhagener und die Bohmsche Interpretation empirisch äquivalent.

Die Form der Geschwindigkeitsgleichung (12.7) kann nicht aus der Schrödingergleichung abgeleitet, sondern nur motiviert werden. Sie bildet aber insofern keine neue Gleichung der Quantenmechanik, als sie proportional zum Wahrscheinlichkeitsfluss ist, der in der Quantenmechanik die Änderung der Wahrscheinlichkeit in Bezug auf räumliche und zeitliche Verteilungen darstellt:

$$j = \frac{\hbar}{2mi} \psi^* \nabla \psi, \quad (12.9)$$

wobei man zeigen kann, dass

$$j = R^2 v. \quad (12.10)$$

Man versteht in der bohmschen Theorie also die Bewegung eines Punktteilchens als entlang der Linie liegend, entlang derer sich der Wahrscheinlichkeitsfluss bewegt.

12.3.1 Zugewinn an Anschauung

Der entscheidende Gedanke in Bohms Formalismus ist der, dass die Ortskoordinate eines physikalischen Objektes jederzeit wohldefiniert ist. Somit leitet die Wellenfunktion das Teilchen wie ein Staubkorn auf einer Wasseroberfläche. Ein *physikalisches System* besteht in der bohmschen Deutung, wie zuvor erwähnt, aus zwei Komponenten:

- einer Wellenfunktion ψ , die die Schrödingergleichung erfüllt, und
- einem Punktteilchen, das an einem Raumzeitpfad entlangwandert und dessen Bewegung durch die Geschwindigkeitsgleichung (12.7) (und somit auch durch das Führungsfeld ψ) determiniert ist.

Auf diese Weise gewinnt Bohm klassischere und anschaulichere Deutungen der Vorgänge in der Quantenwelt. Beispielsweise gelingt eine intuitivanschauliche Deutung des *Doppelspaltexperimentes*: Schließt man einen der beiden Spalte, so zerstört man das *Führungsfeld* und damit die Bewegung des Teilchens, also das Interferenzmuster auf dem Schirm. Der Ort, wo jedes Punktteilchen jeweils ankommt, ist im Prinzip determiniert durch mehrere Faktoren, wie zum Beispiel der wieder klassisch-eindeutigen und scharfen Anfangsposition des Teilchens, der Form von ψ zum Zeitpunkt t_0 , den Interferenzen von ψ , die durch den Doppelspalt entstehen und den zufälligen Fluktuationen von ψ , die sich erst durch das Sub-Quanten-Niveau erklären lassen.

Eine der wichtigsten Ideen der bohmschen Theorie ist diese, dass Materieteilchen wieder *beobachterunabhängige Eigenschaften* besitzen. Damit werden sie physikalisch 'real' - also unabhängig vom Messprozess. Wir können uns Teilchen wieder als Punktteilchen vorstellen. Der Unterschied zwischen klassischer und Bohmscher Hamilton-Jakobi-Theorie liegt dann letztlich aber vor

12 Bohms kausale Non-Kollaps-Deutung

allem noch darin, dass in der klassischen Mechanik ein mechanisches Problem eine einzige eindeutige Lösung hat, wenn das externe Potential und die Anfangsbedingungen (Ort und Impuls) spezifiziert worden sind. Wenn man das Problem im sog. Phasenraum (Raum der Orte und Impulse) löst, erhält man für alle unendlich vielen Lösungen dieselbe eindeutige Bewegung des Teilchens oder Systems.

In der Bohmschen Deutung ist die Spezifikation von Anfangsbedingungen und externem Potential nicht ausreichend, um die Bewegung eindeutig zu bestimmen. Es wird also möglicherweise das Gebot der Einfachheit verletzt, da zusätzlich der Quantenzustand angegeben werden muss.

12.4 Der Messprozess in der Bohmschen Deutung

Wir hatten im Quantenmechanikkapitel gesehen, dass in der Standarddeutung mit einer Messung ein Kollaps der Wellenfunktion herbeigeführt wird, bei dem die sonst vorliegende *Superposition*, die gewichtete Summe aller möglichen Zustände eines Quantensystems

$$\psi = \sum_n c_n \psi_n \quad (12.11)$$

auf einen Eigenzustand ψ_n kollabiert. Dadurch wird das System reduziert - von der Summe aller Möglichkeiten zu einer einzelnen Möglichkeit, $\psi \rightarrow \psi_n$. Dieser Kollaps ist, wie wir erwähnt hatten, eine nichtunitäre Zeitentwicklung, die nicht von der Schrödingergleichung beschrieben wird. In der Kopenhagener Deutung bedeutet dieser Kollaps keinen objektiven Ablauf von Ereignissen in der Zeit.

In der Bohmschen Deutung bedeutet eine Messung eine Interaktion zwischen einem Messgerät und einem Messobjekt, aufgrund derer ein Teil des Messgerätes mit einer Eigenschaft des Messobjektes korreliert wird, was zu einer makroskopisch beobachtbaren Veränderung am Messgerät führt. Während der Messung durchlaufen Messgerät und -objekt eine Zeitentwicklung, die durch den Hamiltonoperator der Messwechselwirkung gegeben ist.

Betrachten wir ein Beispiel, in dem eine Observable nur zwei Eigenwer-

12.4 Der Messprozess in der bohmschen Deutung

te besitzt. ϕ_0 sei die Wellenfunktion des Messgerätes vor der Messung, ϕ_1, ϕ_2 die Wellenfunktionen nach der Messung je eines Eigenwertes. Das Messobjekt habe die Wellenfunktion ψ , mit ψ_1, ψ_2 Eigenzuständen. Befindet sich das Messobjekt vor der Messung in einem Eigenzustand, so erwarten wir, dass zwischen Messgerät im Grundzustand (ϕ_0) und dem einfliegenden Teilchen eine Korrelation stattfinden wird, die das Messgerät so ausrichtet, dass es den Zustand des Quantenobjektes anzeigt. Dafür gibt es dann zwei Möglichkeiten, je nach vorliegendem Eigenwert am Quantenobjekt:

$$\psi_1 \times \phi_0 \rightarrow \psi_1 \times \phi_1 \tag{12.12}$$

$$\psi_2 \times \phi_0 \rightarrow \psi_2 \times \phi_2.$$

Unter Umständen wird sich das Quantenobjekt jedoch nicht in einem eindeutigen Eigenzustand, sondern in einer Superposition befinden: $\psi = c_1\psi_1 + c_2\psi_2$. Korreliert sich dieser Zustand mit dem Messgerät, so gilt:

$$\psi \times \phi_0 \rightarrow c_1\psi_1 \times \phi_1 + c_2\psi_2 \times \phi_2. \tag{12.13}$$

In der bohmschen Mechanik darf die rechte Seite als Wellenfunktion eines einzelnen Messgerätes gedeutet werden. Der *vollständige* Zustand des Systems ist jedoch erst gegeben, wenn man darüber hinaus die Teilchenorte berücksichtigt: also Wellenfunktion *und* Konfiguration. Dem Quantenobjekt wird schließlich, wie zuvor besprochen, eine stetige Teilchenbahn zugeordnet. Diese erreicht kontinuierlich nur einen Zweig der Wellenfunktion (statt beide Zweige). Der Ausgang des Experimentes, bei dem wir entweder ϕ_1 oder ϕ_2 feststellen, ist dann nicht zufällig, sondern deterministisch, aber nicht vorhersagbar, da wir die Anfangsbedingungen nicht kennen.

Von den Teilchenorten wissen wir in der bohmschen Deutung, dass sie gemäß der so genannten *Quantengleichgewichtshypothese* verteilt sind. Demnach lautet die Ortsverteilung ρ von Zuständen mit der Wellenfunktion ψ :

$$\rho = |\psi|^2. \tag{12.14}$$

Dass die Verteilung der Orte gerade eine $|\psi|^2$ -Verteilung erfüllt, hat Antony

12 Bohms kausale Non-Kollaps-Deutung

Valentini¹¹ motiviert¹². Die Teilchenorte sind also nach der Gleichgewichtshypothese verteilt, so dass gilt:

$$|c_1\psi_1 \times \phi_1 + c_2\psi_2 \times \phi_2|^2 = |c_1|^2|\psi_1|^2|\phi_1|^2 + |c_2|^2|\psi_2|^2|\phi_2|^2 + WW - Terme(\phi_1\phi_2)\dots \quad (12.15)$$

Die Zustände ϕ_1, ϕ_2 entsprechen makroskopisch verschiedenen Messgeräteeinstellungen. Zwischen diesen existiert im Konfigurationsraum nur eine minimale Interferenz (Wechselwirkung WW). Deswegen können die Wechselwirkungsterme vernachlässigt werden, wodurch sich dasselbe Ergebnis zeigt wie in der Bornschen Wahrscheinlichkeitsdeutung.

Der konkrete Ausgang des Experimentes wird dann in der bohmschen Deutung durch die Anfangskoordinaten des Quantenteilchens festgelegt, wonach seine kontinuierliche Trajektorie (die dem Wahrscheinlichkeitsstrom folgt) es in einen der beiden möglichen Zweige treibt (der Interferenzzweig ist nahezu ausgeschlossen). In der bohmschen Deutung findet folglich nur ein effektiver Kollaps statt: Dieser ist nicht zufällig und wird nicht durch den Einfluss eines Beobachters ausgelöst.

12.5 Das EPR-Experiment in der bohmschen Deutung

Im EPR-Experiment wird ein verschränkter Zustand betrachtet. Die Wellenfunktion ψ lässt sich also nur als Wellenfunktion des Gesamtsystems angeben, $\psi(x_1, x_2)$, wobei x_1 und x_2 die Orte der verschränkten Teilchen bezeichnen. Die Wellenfunktion faktorisiert also nicht, lässt sich nicht als Produkt zweier Einteilchenzustände schreiben: $\psi_1(x_1)\psi_2(x_2)$. Sei die Wellenfunktion beispielsweise gegeben als:

$$\psi(x_1, x_2) = e^{\frac{i}{\hbar}S} \quad (12.16)$$

¹¹ Valentini, A.: Universal Signature of Non-Quantum Systems, quant-ph/0309107, 2003.

¹²Zu zeigen war, warum sich jede beliebige Ortsverteilung dynamisch zu einer $|\psi^2|$ Verteilung entwickeln sollte. Mit Hilfe einer Analogie zu Gleichgewichtsverteilungen der Thermodynamik gelingt es Valentini, einen Vergleich zum Boltzmannschen H-Theorem zu ziehen und so zu zeigen, dass sich jede Ortsverteilung der $|\psi^2|$ -Verteilung nähern wird.

12.6 Vor- und Nachteile der bohmschen Deutung

und seien ferner $X_1(t)$ und $X_2(t)$ die Trajektorien für die beiden EPR-Teilchen, dann lauten die Bewegungsgleichungen:

$$\begin{aligned}\frac{dX_1(t)}{dt} &= \frac{1}{m_1} \frac{\partial S}{\partial x}(x, X_2(t))|_{x=X_1(t)} \\ \frac{dX_2(t)}{dt} &= \frac{1}{m_2} \frac{\partial S}{\partial x}(x, X_1(t))|_{x=X_2(t)}.\end{aligned}\tag{12.17}$$

Hier sehen wir die Nichtlokalität: Die Bewegung eines Teilchens hängt explizit von dem Teilchenort des jeweils anderen ab. Falls die Wellenfunktion sich als Produkt zweier Einteilchenzustände hätte beschreiben lassen, so ließen sich die Bewegungsgleichungen entkoppeln. Auf obige Weise können die EPR-Korrelationen der Quantenmechanik als individuelle Ereignisse verstanden werden.

12.6 Vor- und Nachteile der bohmschen Deutung

12.6.1 Überlichteinflüsse beim EPR-Experiment

Es bleibt in der bohmschen Interpretation das Problem bestehen, wie man das EPR-Paradoxon so erklären kann, dass es sich in das Theoriegebäude der klassischen oder auch der modernen Physik einfügen lässt. Denn auch in der bohmschen Theorie sind *Überlichteinflüsse* nicht zu vermeiden. Wenn es versteckte Variablen gibt, die determinieren, wann und dass das ungemessene Teilchen sich in dem Augenblick der Messung seines Partnerteilchens ebenfalls aus der Superposition in einen Eigenzustand entwickelt - dann müssten diese verborgenen Parameter eine Überlichtvermittlung verursachen, da das ungemessene Teilchen instantan von der Messung seines Partnerteilchens 'weiß'.

Das Problem muss noch einmal verschärft formuliert werden: Wäre das System klassisch und zu jedem Zeitpunkt derart definiert, dass der Gesamtspin Null ergäbe, wären also die Teilchen zu jedem Zeitpunkt immer wohldefiniert, so würden wir uns über das Messergebnis am einen Teilchen, dass das andere Teilchen somit auch definiert, nicht wundern. Das Problem bei Einstein, Rosen und Podolski tritt aber dadurch auf, dass die Teilchen während des Fluges nicht eindeutig definiert sind. Diese undefiniertheit bleibt stets für zwei von

12 Bohms kausale Non-Kollaps-Deutung

drei Komponenten bestehen, wenn eine von ihnen gemessen wird. Dies gilt auch in der Bohmschen Interpretation.

Führt man nun eine Messung an einer Komponente des Teilchens A durch, so stellt sich für Teilchen B diese Komponente ebenfalls auf einen festen Wert ein, der gerade dem des Teilchens A entgegengesetzt ist. Die beiden anderen Komponenten sowohl von Teilchen A als auch B bleiben jedoch unbestimmt. Hätte man während des Fluges der Teilchen im Experiment das Messgerät derart gedreht, dass eine andere Komponente des Spins von A gemessen würde, so würde sich in der Messung instantan auch bei B die korrespondierende Komponente definiert einstellen, während die anderen Komponenten weiter unbestimmt bleiben. Diese Transmission der 'Information', welche Komponente gemessen wurde, muss mit Überlichtgeschwindigkeit vor sich gegangen sein, auch und gerade dann, wenn man verborgene Variable annimmt, die die Information physikalisch übertragen.

12.6.2 Komplexität der Theorie

Kritiker der Bohmschen Theorie weisen oft darauf hin, dass die Bohmsche Theorie außerdem einer weiteren, zusätzlich zu postulierenden Größe bedürfe: die des *Quantenpotentials*. Dieses sehe außerdem ziemlich beliebig (ad hoc) aus, und es besitze ferner keine beobachtbare Quelle (das e. m. Feld beispielsweise hat die Ladung als Quelle, das Gravitationsfeld die Masse, ...).

Dennoch ist dies kein Argument, das die Bohmsche Theorie gegenüber der Kopenhagener als komplizierter darstellen kann, denn das Quantenpotential ist nicht irreduzibel. Das liegt daran, dass man die Bohmsche Theorie durchaus auch als eine Theorie erster Ordnung verstehen kann, in der die Geschwindigkeit eine gegenüber den anderen Größen ausgezeichnete Stellung einnimmt. In diesem Fall wird die Geschwindigkeit durch die Führungsgleichung definiert und das Quantenpotential ist dann keine notwendigerweise zu postulierende Größe.

Für Bohm jedoch stellte sich das Quantenpotential als zentral dar. Für ihn war nicht die Geschwindigkeit die ausgezeichnete Größe, sondern die Ortskoordinate. In seiner Sicht bewegten sich Punktteilchen mit wohldefiniertem Ort

12.6 Vor- und Nachteile der bohmschen Deutung

unter dem Einfluss von Kräften.

Wir haben bereits gesehen, wie Bohm seine Theorie herleitete, indem er nämlich die Wellenfunktion in ihrer Polarform aufschrieb und die Schrödinger-Gleichung damit neu ausdrückte. Dadurch erhielt er, analog zu unserer Herleitung im vorangehenden Kapitel, zwei gekoppelte Differentialgleichungen, von denen die eine wie eine klassische Hamilton-Jacobi-Gleichung aussieht, die eben nur einen Potentialterm enthält, der unklassisch ist. In dieser Formulierung bezeichnet die Größe des Quantenpotentials zugleich ein Maß dafür, wie weit die Bohmsche Mechanik von der klassischen Mechanik abweicht. Diese Formulierung bedeutet aber auch einen Nachteil: Die Komplexität der Theorie nimmt mit ihr zu. Die in der Kopenhagener Deutung zentrale Schrödingergleichung ist linear und leicht zu lösen (im Prinzip), während die Jacobi-Gleichung nichtlinear ist und außerdem die Kontinuitätsgleichung benötigt wird, um sie zu lösen.

12.6.3 Status der Ortskoordinate

Eine weitere prominente Kritik an der bohmschen Deutung ist der *ausgezeichnete Status der Ortskoordinate*. Warum dieser Status ausgerechnet auf die Ortskoordinate entfällt, ist ein Postulat dieser besonderen Deutung der Quantenmechanik. In seinem Buch "Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics" macht Bell¹³ eine entscheidende Bemerkung. Eine der wichtigsten Schlüsse, die wir aus der bohmschen Mechanik ziehen können, sei der folgende:

[I]n physics the only observations we must consider are *position observations*, if only the *positions of instrument pointers*. It is a great merit of the de Broglie-Bohm picture to force us to consider this fact. If you make axioms, rather than definitions and theorems, about the 'measurement' of anything else, then you commit redundancy and risk inconsistency.¹⁴

¹³Bell, J.: Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics (Collected papers on quantum philosophy). Cambridge University Press, Cambridge 1987.

¹⁴Bell, J.: Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics. S.166.

12 Bohms kausale Non-Kollaps-Deutung

Tatsächlich finden wir in der klassischen Mechanik, dass die Observablen sich als Funktionen der Orte und Impulse ausdrücken lassen. Mit Hilfe der Newtonschen und der Hamiltonschen Gleichungen für die beiden fundamentalen Größen Ort und Impuls lässt sich die klassische Mechanik dann beschreiben. In der Quantenmechanik lassen sich die Observablen nicht durch Orte und Impulse ausdrücken. Sheldon Goldstein folgert dann jedoch in seinem Aufsatz über Bohmsche Mechanik in der Stanford Encyclopedia of Philosophy¹⁵, dass, wenn die Axiome, die wir haben, ausreichen, die *Orientierung der Zeiger von Messgeräten* zu beschreiben (ein wesentlicher Bestandteil der Messung), dann weitere Gesetze über andere Observable *Theoreme* sein müssten und keine Axiome analog zur Tatsache, dass die Energieerhaltung in der klassischen Mechanik ebenfalls ein Theorem und kein Axiom sei.

Die allzeit wohldefinierte Ortskoordinate bringt einen Vorteil mit sich: Ihretwegen verschwindet in der bohmschen Deutung die Notwendigkeit zu fragen, warum wir nicht eine Superposition von Zeigerstellungen beobachten, sondern einen wohldefinierten eindeutigen Wert. Der spezielle Status der Ortskoordinate entpuppt sich also möglicherweise nicht als Schwäche, sondern als weitere Stärke und Nähe zur klassischen Physik des bohmschen Modells. Dennoch darf man nicht übersehen, dass die Klassizität beschränkt ist, denn die Geschwindigkeiten in der bohmschen Mechanik sind keine klassischen Geschwindigkeiten, sondern hängen von der Führungsgleichung (und somit vom Ort!) ab.

¹⁵ Goldstein, S.: Bohmian Mechanics. Stanford Library of Philosophy, first published Fri Oct 26, 2001; substantive revision Fri May 19, 2006.

12.6.4 Status der Wellenfunktion

Eine weitere Kritik an der bohmschen Deutung betrifft die Hochdimensionalität der Wellenfunktion, die nicht ganz leicht zu verstehen ist, da wir normalerweise gewöhnt sind, mit Objekten umzugehen, die drei Raum- und eine Zeitdimension einnehmen. Wäre ψ tatsächlich ein physikalisches Feld wie das elektromagnetische, so hätte es doch als einziges physikalisches Feld eine Dimension, die drei Raumrichtungen und eine Zeitrichtung überschreitet.

Das Feld verursacht in seiner physikalischen Deutung noch weitere Probleme: Die exakten Werte des fluktuierenden ψ -Feldes und damit der Teilchen-Ortskoordinaten sind prinzipiell unbeobachtbar. Damit impliziert ihre Postulierung auch keine weiteren Vorhersagen. Sie sind nur theoretische Möglichkeiten.

Überdies erfolgt zwar eine Wirkung von ψ auf das Teilchen, nicht aber umgekehrt. Newtons drittes Gesetz, dass jeder Kraft eine Gegenkraft entgegenwirkt, scheint also verletzt zu sein. Das Quantenpotential besitzt ferner das Problem, dass es, anders als klassische Potentiale, nicht unabhängig ist von den Prozessen, die es beeinflusst.

Schließlich ist noch zu erwähnen, dass es nicht nur für das Quantenpotential, sondern auch für das ψ -Feld keine Quelle gibt. ψ wird also nicht von einer (verallgemeinerten) Ladung oder Masse erzeugt oder abgestrahlt, sondern existiert einfach.

Das ψ -Feld unterscheidet sich also qualitativ von anderen physikalischen Feldern, die man aus der Natur kennt. Es wird also wahrscheinlich auch nicht durch intermediäre Bosonen vermittelt wie die anderen fundamentalen Naturkräfte. Die hier aufgezählten 'Seltsamkeiten' müssen nicht gegen die Bohmsche Theorie sprechen, erscheinen aber doch neu und anders und bedürfen einer Begründung.

12.6.5 Spins in der bohmschen Deutung

Es wird oft gesagt, die Bohmsche Interpretation könne die Spin-Observable nicht beschreiben. Das ist so nicht richtig. Beispielweise beschreibt die Bohm-

12 Bohms kausale Non-Kollaps-Deutung

sche Mechanik sehr genau, wie Experimente, die den Spin messen, vor sich gehen.

Beim so genannten Stern-Gerlach-Experiment werden durch ein Magnetfeld Elektronen mit ‘Spin up’ von jenen mit ‘Spin down’ in zwei Strahlen separiert. In der bohmschen Beschreibung wird das Führungsfeld ψ , je nach Spin, in Übereinstimmung mit der Schrödingergleichung in zwei Ströme geteilt. Je nachdem, welche Anfangsbedingungen ein Partikel hatte, wird es, wenn es auf dem Führungsfeld reitet, entweder entlang des einen oder des anderen Stromes getragen. In der bohmschen Deutung beschreiben die Spinoperatoren dann nur die Wahrscheinlichkeitsverteilung und keine objektive Eigenschaft des Teilchens.

12.6.6 Kontextualität

Wie aber müssen wir auf den bislang vernachlässigten Einwand reagieren, dass die bohmsche Theorie als Verborgene-Variablen-Theorie kontextuell sein muss, wie es das so genannte Kochen-Specker-Theorem, das wir in Kapitel 14 genauer betrachten werden, für alle verborgene Variablen Theorien vorhersagt? Demnach kann keine Observable gemessen werden, ohne zu beachten, welche weiteren Messungen gerade am Objekt durchgeführt werden - die Ergebnisse sind davon nicht unabhängig.

Ob Kontextualität einen echten Nachteil für die Bohmsche Interpretation darstellt, ist weitgehend unklar. In seinem Beitrag in der Stanford Library of Philosophy meint Sheldon Goldstein, man dürfe Kontextualität einfach nur in dem Sinne verstehen, dass unterschiedliche Experimente unterschiedliche Resultate ergäben. Meines Erachtens ist aber nicht klar, warum dies das Problem der Kontextualität abschwächen sollte: Denkt man klassisch, so existieren wohldefinierte Werte für die Observablen unabhängig davon, ob oder wie wir sie beobachten oder nicht. Diese Werte werden dann mit Hilfe eines Experiments festgestellt. Geht man davon aus, dass das Experiment nicht fehlerhaft ist, so sollte jedes beliebige Experiment denselben Wert feststellen.

Was aber bedeutet Kontextualität in der bohmschen Mechanik? Innerhalb der Deutung findet eine Auszeichnung der Ortsvariablen statt, während alle

12.6 Vor- und Nachteile der bohmschen Deutung

anderen Observablen kontextualisiert werden (von der Messung abhängen). In einem EPR-Experiment kann also beispielsweise der Spin nicht als Eigenschaft dem Teilchen zugeordnet werden, sondern nur der Wellenfunktion.

In seinem Buch "Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics" schlägt Bell eine weitere Moral vor, die wir aus der bohmschen Deutung gewinnen können:

I suspect that they were misled by the pernicious misuse of the word measurement in contemporary theory. This word very strongly suggests the ascertaining of some *preexisting* property of some thing, any instrument involved playing a purely passive role. Quantum experiments are just not like that, as we learned especially from Bohr. *The results have to be regarded as the joint product of system and apparatus, the complete experimental set-up.* But the misuse of the word measurement makes it easy to forget this and then to expect that the results of measurements should obey some simple logic in which the apparatus is not mentioned.¹⁶

Bells Meinung nach ist es also ein falscher Gebrauch des Begriffes der 'Messung', der zu Problemen führt, da es andeute, dass objektiv, ontologisch existierende Eigenschaften aufgedeckt würden, ohne die gesamte experimentelle Situation einzubeziehen. In Kapitel 14 werden wir das so genannte Kochen-Specker-Theorem diskutieren, bei dem die notwendige Kontextualität Verborgener-Variablen-Theorien deutlich wird. Zum Ende der Arbeit werden wir dann jedoch argumentieren, dass dies in Bezug auf wissenschaftliches Verstehen keinen Nachteil für die Bohmsche Deutung gegenüber der ebenfalls kontextuellen Kopenhagener oder Maudlinschen Deutungen darstellt.

12.6.7 Nichtlokalität und Lorentzinvarianz

Nicht zuletzt stellt sich auch die Frage, wie wir mit der Nichtlokalität in der bohmschen Mechanik umgehen sollen, die durch die Abhängigkeit der Ge-

¹⁶Bell, J.: Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics. S. 166.

12 Bohms kausale Non-Kollaps-Deutung

schwindigkeit von allen anderen Teilchenorten eingeführt wird. Goldsteins Meinung nach liegt hier aber nur jene Form der Nichtlokalität vor, die sich ganz allgemein im EPR-Fall zeigt:

It should be emphasized that the nonlocality of Bohmian mechanics derives solely from the nonlocality built into the structure of standard quantum theory, as provided by a wave function on configuration space, an abstraction which, roughly speaking, combines or binds distant particles into a single irreducible reality.¹⁷

Die einzige irreduzible Realität, die sich auch in der Kopenhagener Deutung im EPR-Experiment zeigt, sei identisch mit der bohmschen Nichtlokalität, so das Argument Goldsteins. Allerdings scheint er dabei eine prozessural-kausale Deutung der Wellenfunktion der reinen Beschreibung der Kopenhagener Deutung vorzuziehen, denn in der Kopenhagener Deutung konnte die Nichtlokalität ja umgangen werden, indem man den Kollaps gerade nicht als physikalischen Prozess auffasst.

Auch Bell sieht die bohmsche Interpretation nur als Verdeutlichung der auch in der klassischen Quantenmechanik bereits vorliegenden Nichtlokalität, wenn er schreibt:

That the guiding wave, in the general case, propagates not in ordinary three-space but in a multidimensional-configuration space is the origin of the notorious nonlocality of quantum mechanics. It is a merit of the de Broglie-Bohm version to bring this out so explicitly that it cannot be ignored.¹⁸

Bell sieht es also als Vorteil der bohmschen Deutung, dass die auch in der Kopenhagener Deutung auftretende Nichtlokalität hier so explizit herausgearbeitet wird, dass sie nicht ignoriert werden kann. Die bohmsche Mechanik

¹⁷Goldstein, S.: Bohmian Mechanics.

¹⁸Bell, J.: Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics.

12.6 Vor- und Nachteile der bohmschen Deutung

macht ihre Inkompatibilität mit der Lorentzinvarianz, die wir im vorangehenden Kapitel anhand Maudlins Überlegungen als zentrales Problem der Kollapsdeutungen der Quantenmechanik erkannt haben, auch für eine Nichtkollapstheorie dadurch besonders deutlich, dass die Geschwindigkeit eines Punktteilchens in der Führungsgleichung von den Positionen aller anderen umgebenden Teilchen des Systems *zu einer bestimmten Zeit* abhängt. Dieses Konzept einer ausgezeichneten Zeit ist jedoch per se nicht lorentzinvariant. Tatsächlich hängt die fehlende Lorentzinvarianz zusammen mit der Nichtlokalität der bohmschen Mechanik, die ja ebenfalls sich dadurch ausdrückt, dass eine Geschwindigkeit von Teilchen an weit entfernten Orten abhängt.

Es gibt einen neuen Ansatz, der zumindest am Rande erwähnt werden soll. In diesem wird die Lorentzinvarianz als eine Symmetrie verstanden, die erst in Mehrteilchensystemen und im Gleichgewicht entsteht. In seinem sehr ausführlichen Buch "The Quantum Theory of Motion" vertritt Peter Holland¹⁹ diese Theorie. Inwiefern sich dieser Ansatz jedoch nutzen lassen wird, um sowohl Kollaps- als auch Nichtkollapstheorien eine lorentzinvariante Form zu geben, ist bislang noch Gegenstand aktueller Forschung.

¹⁹Holland, P.: The Quantum Theory of Motion. Cambridge University Press, Cambridge 1993.

13 Vergleich der Deutungen

Nachdem drei unterschiedliche Interpretationen der Quantenmechanik am Beispiel des EPR-Experiments vorgestellt wurden, stellt sich die Frage, welche dieser Interpretationen mehr *Verstehen* ermöglicht als die anderen. Dazu analysieren wir im Folgenden die Interpretationen in Bezug auf die von uns vorgeschlagene Definition wissenschaftlichen Verstehens. Während in der Physik die Deutungen als epistemisch äquivalent und somit gleichberechtigt gelten und ihre individuelle Bevorzugung als eine reine Geschmacksfrage betrachtet wird, soll sich zeigen, dass in Bezug auf die hier gegebene Definition von Verstehen sich die Theorien unterscheiden und in Hinblick auf ihre Verstehbarkeit bewerten lassen.

13.1 Verstehbarkeit quantenmechanischer Interpretationen

Die vorliegende Arbeit hat eine neue Definition wissenschaftlichen Verstehens vorgestellt. Diese besteht in einem hinreichenden und notwendigen Kriterium für Verstehen, K , wonach gilt, dass ein Wissenschaftler in einem gegebenen Kontext eine Theorie verstanden hat, wenn er, ohne explizite Rechnungen durchzuführen, mit ihrer Hilfe qualitativ adäquate Vorhersagen treffen kann. Diese qualitativen Vorhersagen werden individuell möglich, indem die Theorie bestimmte Bündelkriterien κ_i erfüllt, wie das Prinzip der Kausalität, das der Stetigkeit, der Vereinheitlichung, der Symmetrien u.s.w.¹ Es zeigte sich, dass keinem der Bündelkriterien in Bezug auf Verstehen ein privilegierter Status zukommt.

¹Siehe das entsprechende Kapitel zu wissenschaftlichem Verstehen.

13 Vergleich der Deutungen

Der hier vorgestellte Verstehensbegriff hat sich als insofern pragmatisch erwiesen, als die Möglichkeit einer qualitativen Vorhersage vom Kontext des Wissenschaftlers abhängt, der die Bündelkriterien individuell gewichtet. Es gilt dann, dass eine Theorie als umso verstehbarer zu bezeichnen ist, je mehr Kriterien des Bündels erfüllt sind: in dem Sinne nämlich, als es dann für eine möglichst große Anzahl von Wissenschaftlern möglich wird, eine qualitative Vorhersage zu treffen.

Es zeigte sich ferner, dass die Bündelkriterien eine Motivation darstellen, nach einer komplexeren Theorie zu suchen, die immer noch weitere Bündelkriterien berücksichtigt. Das Ziel - ein kohärentes Weltbild - kann so im Zuge der Berücksichtigung einer größeren Anzahl von Bündelkriterien zu einem größeren Anwendungsgebiet für die Theorie und zu thematisch weiter reichenden Vorhersagen führen - und auch in diesem Sinne ein weiterreichendes Verstehen ermöglichen.

Dass Einstein, Podolski und Rosen oder auch Feynman die Quantenmechanik als *unverständlich* oder *unverstanden* bezeichneten, wurde in dieser Arbeit als ein Missverständnis gedeutet: im Sinne obiger Definition wissenschaftlichen Verstehens ist nicht die Quantenmechanik unverstanden, da mit ihr qualitative Vorhersagen, beispielsweise über das EPR-Experiment, möglich sind. Vielmehr ist jenes empfundene Unbehagen begründet in dem Wunsch, eine Theorie zu suchen, die mehr Bündelkriterien κ_i , wie Kausalität, Stetigkeit etc. beinhaltet, um im besten Falle zu weiterreichenden Vorhersagen befähigt zu werden, auch dadurch, dass ein kohärenteres Weltbild erreicht wird.

Als Beispiele für Interpretationen der Quantenmechanik, die unterschiedliche Bündelkriterien berücksichtigen, hatten wir die Kopenhagener Deutung, die kausale Kollapsdeutung Tim Maudlins und die kausale Deutung Bohms vorgestellt. In diesem Kapitel sollen die Interpretationen bezüglich des durch sie ermöglichten wissenschaftlichen Verstehens verglichen werden.

13.2 Die Kopenhagener Deutung im Vergleich mit Maudlins Interpretation

Bei der Betrachtung der von Niels Bohr vertretenen Kopenhagener Deutung spielte der Kollaps der Wellenfunktion, wie später auch in Maudlins Hyperebenen-Interpretation, eine zentrale Rolle. In der Kopenhagener Deutung bleibt der Kollaps jedoch epistemisch - er besitzt darüber hinaus keine physikalisch-prozesshafte Beschreibung und wird in keiner Weise weiter 'aufgelöst' oder physikalisiert.

Die Aussage der Kopenhagener Deutung über den Kollaps ist, dass er durch eine Messung herbeigeführt wird und dabei die zuvor existierende Superposition auf einen Eigenzustand kollabiert. Wir verstehen nichts darüber hinaus; wie der Kollaps stattfindet, bleibt unbekannt und unerklärt.

In dieser Deutung muss nur das Prinzip der Separabilität aufgegeben werden, da Eigenschaften verschränkter Teilchen voneinander abhängen und sich unter Umständen im Augenblick einer Messung instantan auch über raumartige Distanzen hinweg in Form korrelierter Messwerte realisieren können. Das Prinzip der Lokalität bleibt jedoch insofern erhalten, als mit dem Kollaps kein physikalischer Prozess vorliegt; also keine physikalische Interaktion zwischen raumartig entfernten Objekten stattfindet.

Im Gegensatz dazu bemüht sich Tim Maudlin um eine physikalisch-kausale Deutung des Kollapses über die reine Beschreibung korrelierter Messwerte hinaus. Er sucht nach einem physikalischen Verständnis und stellt sich Fragen nach dem tatsächlichen physikalischen Geschehen beim Kollaps und seiner praktischen Verwirklichung.

Wie wir gesehen haben, führt ihn seine Analyse zu der Schlussfolgerung, dass der Kollaps als kausaler Prozess mit Überlichtgeschwindigkeit stattfinden muss. Somit muss Maudlin sowohl das Prinzip der Separabilität - also eigenständiger Eigenschaften - als auch das Prinzip der Lokalität aufgeben. Eigenschaften hängen also von einer gesamten Hyperebene ab (Verletzung der Separabilität), und der Kollaps findet instantan über raumartige Distanzen statt (Verletzung der Lokalität).

13 Vergleich der Deutungen

Neben diesen Nachteile besitzt die Maudlinsche Deutung auch Vorteile für wissenschaftliches Verstehen, denn der Maudlinsche Kollaps genügt dem klassischen Partikularismus, den auch Einstein verfolgte, da die Korrelation zwischen den Messergebnissen des EPR-Experiments sich nun als kausal verursacht begreifen lässt. Eine Messung an A verursacht das Ergebnis der Messung an B - im Sinne des in dieser Arbeit verwendeten Kausalbegriffes einer Kontaktwechselwirkung (die Information der Messung wird mit Überlichtgeschwindigkeit an das andere Ende des Messapparats weitergeleitet). Der von Maudlin verwendete Kausalbegriff unterscheidet sich vom klassischen Kausalbegriff, da Kausalität in seiner Deutung vom Bezugssystem abhängt. Diese Tatsache konnten wir jedoch nicht als Nachteil in Bezug auf Verstehen identifizieren.

Wenngleich die innere Natur der Überlichtverbindung unklar bleibt - Maudlin stellt keine Gedanken darüber an, ob die kausale Verbindung mit Hilfe von Austauscheteilchen stattfindet oder über gekrümmte Räume abläuft etc. -, können wir uns doch einen Schritt näher an den Kollaps heran bewegen als in einer rein epistemischen Formulierung. Es entsteht der Eindruck, dass wir uns das EPR-Problem zugänglicher gemacht haben. Ein kausaler Prozess steht vor unserem inneren Auge, der durch eine Messung ausgelöst wird und die Korrelation am anderen Ende des Messapparates durch eine Überlichtkausalität induziert.

Es scheint, als hätte Maudlins Interpretation den Nebel um den Kollaps ein wenig gelichtet und den Blick freigegeben auf einen verstehbaren 'Prozess'. Dieser erscheint unter Umständen auch deswegen verstehbarer, als kausale Prozesse unser Leben bestimmen und uns in den Verstehensstrukturen unseres Alltags vertraut sind. Dass die hier vorliegenden Prozesse dann mit Überlichtgeschwindigkeit ablaufen müssen, wirkt wie ein weiteres zu klärendes Problem, nachdem man aber dem Verstehen bereits einen Schritt näher gekommen ist. Schließlich war die Grenze der Lichtgeschwindigkeit nicht unter den Bündelkriterien für Verstehen aufgeführt worden, so dass sich Maudlins Theorie durch diese Problematik nicht als unverständlicher erweist.

Maudlins Ansatz bringt Nichtlokalität und Nichtseparabilität mit sich, beinhaltet also, anders gesagt, nicht die Kriterien der Lokalität und der Sepa-

13.2 Die Kopenhagener Deutung im Vergleich mit Maudlins Interpretation

rabilität, die wir eingangs als für Verstehen nützlich identifiziert hatten. Die Kopenhagener Deutung ist im Vergleich dazu 'nur' nichtseparabel; da sie keinen prozessuralen Kollaps postuliert, gibt es auch keinen nichtlokalen Prozess.

Verliert also Maudlins Ansatz gegenüber der Kopenhagener Deutung in Bezug auf das 'Verstehen', das er in uns erzeugt? Dafür betrachten wir die Bündelkriterien, die Maudlins Ansatz erfüllt. Während der Kollaps der Wellenfunktion in der Kopenhagener Deutung rein epistemisch bleibt, erhält er bei Maudlin eine prozessurale und mechanistisch-kausale Deutung. Eine Messung an einem Teilchen an einem Ende des Experimentes ist kausal dafür verantwortlich, dass das Ergebnis am anderen Ende der Messapparatur einen korrelierten Messwert ergibt. Somit verstehen wir zumindest, wie es zu einer Korrelation kommen kann - sie wird durch die Messung am einen Ende herbeigeführt und mit Überlichtgeschwindigkeit instantan zum anderen Ende übertragen.

Maudlins Deutung verwendet also die Prinzipien der Kausalität und der prozessuralen 'Mechanismen'. Überdies ist der maudlinsche Ansatz trotz Überlichtgeschwindigkeiten lorentzinvariant. Die Kopenhagener Deutung jedoch ist nicht lorentzinvariant, da sie die Schrödingergleichung verwendet, die nur galileiinvariant ist (eine schwächere Forderung erfüllt).

Auch Maudlins Deutung verwendet die Schrödingergleichung, postuliert jedoch zusätzlich eine Multitüde von Hyperebenen, entlang derer der Kollaps instantan stattfindet, wodurch Lorentzinvarianz gesichert werden kann. Ob diese Interpretation jedoch noch dem Kriterium der Einfachheit genügt, ist fraglich und muss - obgleich dieses Kriterium Ermessensspielraum bietet - wohl verneint werden.

Obwohl Maudlins Ansatz also, anders als die Kopenhagener Deutung, das Prinzip der Lokalität und möglicherweise das der Einfachheit verletzt, erfüllt er die Bündelkriterien der Kausalität, der Mechanismen und der Lorentzinvarianz. Aufgrund der von uns eingangs vorgeschlagenen Bewertung von Theorien, wonach diese als umso verstehbarer gelten, je mehr Bündelkriterien κ_i sie erfüllen, stellt sich Maudlins kausale Kollapsdeutung insgesamt als verstehbarer dar.

13.3 Die Kopenhagener Deutung im Vergleich mit Bohms Interpretation

Bei der Diskussion der Bohmschen Interpretation der Quantenmechanik hatten wir festgestellt, dass diese sich äußerlich nur in wenigen formalen Punkten von der klassischen Quantenmechanik unterscheidet. Sie verwendet dasselbe theoretisch-formale System. Dennoch ist sie in der Interpretation der auftretenden Größen stark abweichend von der Interpretation der Kopenhagener Deutung.

13.3.1 Führungsfeld und Ortskoordinate

Was die Bohmsche Theorie hauptsächlich von der Kopenhagener Deutung unterscheidet, ist der Status der allzeit wohldefinierten Ortskoordinate. Ferner unterscheiden sich die Deutungen in der Rolle, welche die Wellenfunktion spielt: Während in der Kopenhagener Deutung ψ die Rolle einer abstrakten Funktion zukommt, deren Absolutbetrag quadriert erst einer Wahrscheinlichkeitsdichte - und somit einer beobachtbaren, realen Größe - entspricht, besitzt in der Bohmschen Quantenmechanik ψ selbst eine 'Realität', insofern als ψ beobachtbare Auswirkungen hat. Dies geschieht über die Interpretation der Wellenfunktion als *Führungsfeld*, das eine Kraft auf Teilchen ausübt und somit in gleicher Weise als real gelten kann, wie beispielsweise das elektrische Feld.

Das Feld ψ besitzt ein bestimmtes, aus der Kontinuitätsgleichung ableitbares Potential Φ , vergleichbar mit einem elektrischen Potential, und die Änderung eines Potentials stellt eine Kraft dar:

$$\nabla\Phi \sim \mathbf{F}. \quad (13.1)$$

Die Änderung des Quantenpotentials entspricht dann also einer physikalischen Kraft F . Diese Kraft ist in der Bohmschen Mechanik ursächlich verantwortlich für die Bewegung eines Teilchens.

13.3.2 Welle-Teilchen-Dualismus und Stetigkeit

Wie in Abschnitt 12.6.3 erläutert wurde, ist die Ortskoordinate eines Quantenzustands in der Bohmschen Theorie eine allzeit wohldefinierte Variable. Durch ihre Einführung verschwindet in der Bohmschen Interpretation der Welle-Teilchen-Dualismus, der in der Kopenhagener Deutung ein zentrales Element darstellte. In der Bohmschen Deutung verhält sich nicht das Teilchen selbst ‘mal wie eine Welle und mal wie ein Teilchen’, sondern es bleibt während aller Prozesse stets ein Punktteilchen und erhält seinen Wellencharakter nur über die ihm durch das Feld ψ und die Kraft F zugefügte unklassische Bewegung.

Die Bohmsche Quantenmechanik ist in dieser Weise, anders als die Kopenhagener Deutung, eine kontinuierliche Theorie. Da das allzeit in seiner Ortskoordinate wohldefinierte Teilchen wie ein Staubkorn auf einer Welle reitet, durchläuft es dabei eine stetige Bahn, einen kausalen Pfad in der Raumzeit. Die quantisierten Energieniveaus der klassischen Quantenmechanik werden in ihr als Mittelwerte verstanden, besitzen aber keine fundamentale Bedeutung. Sie berücksichtigt also das von uns eingangs als Bündelkriterium für Verstehen identifizierte Prinzip der Stetigkeit der Veränderung. Auch Impuls und Energie sind aufgrund der Wohldefiniertheit der Ortskoordinate in der Bohmschen Deutung kontinuierliche Größen, es gibt keine Quantensprünge.

13.3.3 Eigenschaften, Lokalität und Wahrscheinlichkeiten

Nicht zuletzt unterscheiden sich die Kopenhagener Deutung und die Bohmsche Interpretation auch in ihrem Verständnis von ‘Eigenschaften’ physikalischer Zustände und somit in ihrer Vorstellung von ‘Individuen’, d. h. von individuellen Objekten. In der Bohmschen Theorie besitzt ein Teilchen seine Ortskoordinate, seine Position im Raum - die man in der Kopenhagener Interpretation durch Messung erst erzeugt - die ganze Zeit hindurch und unabhängig von Beobachtungen. Somit sind die Bohmschen ‘Punktteilchen’ individuiert.

Jedoch gelingt es der Bohmschen Theorie nicht, eine lokale klassische Theorie zu formulieren, denn die Bewegung der Punktteilchen hängt von der gesamten Umgebung ab - beispielsweise von den Orten aller anderen umgebenden Teilchen. Diese beeinflussen instantan über das Führungsfeld den Pfad

13 Vergleich der Deutungen

eines Teilchens. Wir werden auf diese Form der Nichtlokalität im Vergleich mit Maudlins Theorie in Abschnitt 13.4 noch einmal genauer eingehen.

Ein letzter wichtiger Unterschied zwischen der Kopenhagener Deutung und Bohms Interpretation ist der, dass in der bohmschen Theorie die Aufenthaltswahrscheinlichkeit für einen bereits vorliegenden Zustand angegeben wird. Dabei bezieht sich die Wahrscheinlichkeit auf das partielle Wissen, das wir von einem Zustand haben, und ist somit also vergleichbar mit dem klassischen Begriff der Wahrscheinlichkeit.

In der Kopenhagener Interpretation bedeutete $|\psi|^2$ die Wahrscheinlichkeitsverteilung der möglichen Messwerte eines Systems. In der Bohmschen Quantenmechanik ist ein Ensemble von *Teilchen*, das zur selben ψ -Welle gehört, nach R^2 verteilt, wobei R die reelle Amplitude des Führungsfeldes ist (siehe Gleichung (12.6)). Auf diese Weise reproduziert das *Teilchen*-Ensemble die von der klassischen Quantenmechanik vorhergesagten Verteilungen.

13.3.4 Welche Deutung ermöglicht das beste Verstehen?

Wie wir gesehen haben, erfüllt die bohmsche Deutung keineswegs alle der von uns eingangs diskutierten Bündelkriterien für Verstehen (die Theorie ist u. a. nichtlokal). Dennoch schneidet sie im Vergleich mit der Kopenhagener Deutung insofern als klassischere Theorie ab, als ihr durch die Existenz von allzeit in der Ortskoordinate wohldefinierten *Punktteilchen* eine größere Visualisierbarkeit und eine objektivere Deutung zu gelingen scheinen (die Ortskoordinate ist eine beobachtungsunabhängige Eigenschaft physikalischer Zustände).

Die bessere Visualisierbarkeit lässt sich am Experiment des Doppelspaltes verdeutlichen: Dieses stellt sich in der Kopenhagener Deutung als Mysterium dar. In unverständener Weise werden dort Wellen- und Teilcheneigenschaften von Photonen, aber auch von Elektronen oder selbst von größeren Molekülen sichtbar. Sie scheinen als Wellen zu propagieren, jedoch sich auf dem Schirm als Teilchen zu manifestieren. Wie die Transformation zwischen beiden Zuständen stattfindet, wird nicht weiter erklärt - kein Mechanismus aufgedeckt oder analysiert. Die Kopenhagener Deutung liefert hier eine bloße Beschreibung der Messergebnisse und keine tiefere, möglicherweise mechanistische Erklärung.

13.3 Die Kopenhagener Deutung im Vergleich mit Bohms Interpretation

Die bohmsche Mechanik jedoch liefert genau eine solche tieferliegende Erklärung. In dieser Deutung bewegt sich ein Punktteilchen auf einem Führungsfeld mit Wellencharakter. Hier wird das Teilchen sich durch einen der beiden Spalte bewegen, und nicht durch beide. Der Interferenzcharakter auf dem Bildschirm wiederum entsteht dann dadurch, dass das wellenförmige Führungsfeld mit sich selbst interferiert und nur bestimmte Pfade der Punktteilchen, die auf dem Führungsfeld liegen, erlaubt.

Die Erklärung der bohmschen Mechanik liegt letzten Endes darin, den Übergang zwischen Welle und Teilchen nicht länger als Übergang zu deuten, sondern allzeit zwei getrennte Zustände zu betrachten: das stets wellenförmige Führungsfeld und das stets punktförmige Teilchen, dessen Pfade vom Führungsfeld vorgeschrieben werden. Der Welle-Teilchen-Dualismus wird hier also aufgelöst, indem man ihn als Missverständnis begreift: Nicht eine Entität besaß zwei Zustände, deren Übergang zu erklären war, sondern die Entität ließ sich in zwei Entitäten auflösen mit jeweils wohldefinierten Zuständen.

Darüber hinaus gelingt der Bohmschen Mechanik auch in Bezug auf das so genannte Messproblem, oder den Kollaps der Wellenfunktion, eine scheinbar tiefer reichende prozessurale und somit verstehbarere Antwort. In der Kopenhagener Deutung gibt es einen Unterschied zwischen einem ungemessenen und einem gemessenen System. Während das ungemessene System sich deterministisch nach der Schrödingergleichung entwickelt und Zustände in Superpositionen vorliegen, zeichnet sich der gemessene Zustand dadurch aus, dass er ein Eigenzustand der gemessenen Observablen ist und ein bestimmter zum Eigenzustand gehörender und zufällig ausgewählter Eigenwert aus dem Spektrum an diesem Eigenzustand messbar ist. Wie der Übergang zwischen Superposition und Eigenzustand jedoch physikalisch stattfindet und auch warum er so geschieht (warum überhaupt, einerseits, und warum in dieser Weise andererseits), bleibt offen, man beschränkt sich auf die Berechnung der Wahrscheinlichkeiten des Auftretens der verschiedenen Eigenwerte.

Der Unterschied zwischen der Kopenhagener und der bohmschen Deutung der Quantenmechanik bezüglich der Beschreibung des Messproblems liegt also darin, dass in der bohmschen Deutung kein Messproblem auftritt. Dadurch, dass die bohmsche Deutung Untersysteme definiert, die nur bei hinreichender

13 Vergleich der Deutungen

Entkopplung von der Umgebung sich nach der Schrödingergleichung entwickeln - wie beispielsweise ein *freies* ψ -Feld, wohingegen schon die Anwesenheit eines Doppelspaltens dieses Feld verformt - berücksichtigt die bohmsche Deutung, anders als die Kopenhagener, den Unterschied zwischen deterministischer Beschreibung und nicht-schrödingerischem Verhalten bei Interaktion eines Objektes mit einem Messgerät. In der bohmschen Deutung wird der Kollaps der Wellenfunktion, ähnlich wie bei der zunehmend beliebten Dekohärenztheorie², zu einer Konsequenz der Umgebungseinwirkung, welche die Wellenfunktion wie Wasser in viele verschiedene Kanäle drängt, entlang derer Teilchen dann 'fließen' können - was einerseits Visualisierungen ermöglicht und andererseits einen prozessuralen Mechanismus darstellt.

In der Bohmschen Theorie ist ein beobachtetes System nie ein isoliertes System, sondern bestenfalls ein Untersystem eines isolierten Gesamtsystems, das aus Messapparat und beobachtetem Objekt besteht. Diese beiden Systeme kann man aufteilen, wie es beispielsweise Dürr, Goldstein und Zanghi³ gezeigt haben. Nur das Obersystem $\psi(X, Y)$ entwickelt sich dann deterministisch nach der Schrödingergleichung. Dürr und seine Kollegen haben gezeigt, dass die abhängige Wellenfunktion des Subsystems Y dann - und nur dann - der Schrödingergleichung gehorcht, wenn das Subsystem hinreichend von seiner Umgebung entkoppelt ist. Es muss dabei, im Detail, eine Produktform zwischen der Wellenfunktion für X und der für Y vorliegen. Ist dies nicht der Fall, so folgt das System nicht exakt der Schrödingergleichung, wodurch der Unterschied zwischen Messprozess (Interaktion mit der Umgebung) und isoliertem Quantensystem (Superposition) beschrieben werden kann.

Mit Hilfe der bohmschen Interpretation gelingt außerdem ein vereinheitlichtes Konzept der Wahrscheinlichkeit, denn in der Bohmschen Mechanik wird das Absolutquadrat der Wellenfunktion (die Wahrscheinlichkeitsdichte) etwa

²Siehe hierzu *Ghirardi, G., Rimini, A. und Weber, T.:* A Model for a Unified Quantum Description of Macroscopic and Microscopic Systems. In: *Accardi, L. et al. (eds.): Quantum Probability and Applications.* Springer, Berlin 1985.

³Siehe hierzu *Dürr, D., Goldstein, S. und Zanghi, N.:* Quantum Equilibrium and the Origin of Absolute Uncertainty. *Journal of Statistical Physics* 67, Section 5 (1992), S. 843-907.

13.3 Die Kopenhagener Deutung im Vergleich mit Bohms Interpretation

im Sinne einer thermodynamischen Dichte verstanden, der Form

$$\rho = \frac{e^{-H/kT}}{Z}, \quad (13.2)$$

wobei Z die Zustandssumme ist und k die Boltzmannkonstante. Gleichung (13.2) stellt dann eine Wahrscheinlichkeitsverteilung im Phasenraum eines Punktsystems im Gleichgewicht bei Temperatur T dar.⁴

So wie die Maxwellsche Geschwindigkeitsverteilung aus der Analyse des klassischen thermodynamischen Gleichgewichts abgeleitet werden kann, so kann die Wahrscheinlichkeitsverteilung für Orte in der Bohmschen Deutung aus einer Gleichgewichtsanalyse der deterministischen dynamischen Systeme der Bohmschen Mechanik hervorgehen - was eine Analogie zwischen einer unklassischen und einer klassischen Theorie erlaubt. Die Bohmsche Mechanik sieht die Quantenzustände also letztlich als Gleichgewichtszustände, wodurch die Quantenmechanik der klassischen Thermodynamik ähnlich wird. Mit dieser Analogie wird ein weiteres Bündelkriterium für Verstehen erfüllt.

Es folgt aus obiger Analyse, dass die Bohmsche Theorie gegenüber der Kopenhagener Deutung im Sinne unserer eingangs gegebenen Definition wissenschaftlichen Verstehens als verstehbarer gelten muss. Obwohl sie, anders als die Kopenhagener Deutung, das Prinzip der Lokalität verletzt, erfüllt sie insgesamt mehr Bündelkriterien κ_i als die Kopenhagener Deutung. Wie wir analysiert haben, bietet sie eine mechanistische und visualisierbare Deutung des Welle-Teilchen-Dualismus, in dem Punktteilchen auf der Wellenfunktion ψ reiten wie Staubkörner auf einer Welle. Beide Entitäten (Teilchen und Wellenfunktion) sind individuiert. Ferner wirkt das Führungsfeld mit einer Kraft auf das Teilchen, was eine kausale Interpretation seines Verhaltens ermöglicht. Auch legen die Teilchen in dieser Interpretation stetige Pfade zurück: Es existieren keine Unstetigkeiten wie Quantensprünge. Nicht zuletzt gelingt in der Bohmschen Deutung eine Analogie der Wahrscheinlichkeiten zu den Wahrscheinlichkeiten der klassischen Thermodynamik, insofern als die Wahrscheinlichkeiten hier eine Unwissenheitsinterpretation zulassen.

⁴Dürr et al. haben jedoch argumentiert, dass sowohl in der Kopenhagener Deutung als auch in der Bohmschen die letzte Rechtfertigung der spezifischen Wahrscheinlichkeitsverteilungen in einem 'typischen' Universum fehlt.

13.4 Maudlins Deutung im Vergleich mit Bohms Interpretation

Wie wir gesehen haben, bemüht sich Tim Maudlin um eine physikalisch prozessurale Deutung des Kollapses der Wellenfunktion. Im Laufe seiner Analyse stellt sich heraus, dass der Flemingsche Hyperebenenansatz eine der wenigen Möglichkeiten darstellt, diese Deutung der Quantenmechanik lorentzinvariant zu formulieren und somit die Spezielle Relativitätstheorie mit dem EPR-Experiment zu verbinden.

13.4.1 Separabilität und Lokalität

Im Laufe der Analyse der Deutung von Tim Maudlin zeigte sich, dass in einer solchen Interpretation sowohl das Prinzip der Separabilität, als auch das Prinzip der Lokalität verletzt werden müssen: Eigenschaften hängen von einer gesamten Hyperebene ab, und der Kollaps geschieht instantan über raumartige Distanzen in einer Hyperebene hinweg. Auch bei Bohm müssen beide klassischen Prinzipien aufgegeben werden.

Die Wellenfunktion beinhaltet Informationen über alle Teilchen der Umgebung: Ändert sich deren Konfiguration, so spürt das Punktteilchen dies instantan. Dies liegt daran, dass der Pfad des Punktteilchens durch eine Kraft bestimmt wird, die ψ und somit auch deren Abhängigkeit vom gesamten Ensemble beinhaltet. Überdies ist auch bei Bohm (genau wie bei Maudlin) das Prinzip der Separabilität verletzt, da verschränkte Teilchen keine unabhängigen Eigenschaften besitzen.

Wir haben in vorangehenden Kapiteln bereits erörtert, dass auch die Kopenhagener Deutung fundamentalen Problemen begegnet (sie ist ebenfalls nichtseparabel und verwendet den Welle-Teilchen-Dualismus). In der vorangehenden Diskussion hatte es sich jedoch herausgestellt, dass Maudlin durch seine kausal-prozessurale Deutung des Kollapses als physikalischen Prozess einen Schritt näher an ein Verständnis des Kollapses gelangt als die Kopenhagener Deutung, die sich mit einer epistemischen Formulierung zufrieden gibt. Bohms Interpretation ist bezüglich der Prinzipien der Lokalität und der Separabilität

in Hinblick auf das ermöglichte Verstehen gleichwertig mit der Maudlinschen Deutung.

13.5 Verstehen in Kollaps- und Non-Kollaps-Theorien

Vergleicht man Maudlins Deutung mit der bohmschen, so vergleicht man zwei verschiedene Interpretationen des Messproblems: die Kollaps-Interpretation, bei der im Augenblick der Messung die Wellenfunktion auf einen Eigenzustand kollabiert, mit einer Non-Kollaps-Deutung, bei der zu jedem Zeitpunkt ein Punktteilchen und das Führungsfeld existieren. Dieses Punktteilchen wird in der kollapsfreien Interpretation Bohms dann im Messapparat registriert - seine Ortskoordinate also, anders als bei der Kopenhagener Deutung, nicht erst durch die Messung (und durch einen Kollaps) wohldefiniert, sondern nur festgestellt.

Anders als in der Maudlinschen Deutung, in der die physikalische Natur der Überlichtwechselwirkung eine unbeantwortete Frage bleiben musste, gibt Bohms Deutung dafür eine Antwort: Es ist das Führungsfeld ψ , das wie eine weit ausgedehnte Wasseroberfläche beide Teilchen zu ihren Messapparaturen führt und die Korrelation begründet (in ihrer nichtlokalen Struktur). Es bedarf also keines Austauschteilchens, das mit Überlichtgeschwindigkeit zu propagieren beginnt, sobald ein Teilchen gemessen wurde, sondern die Wellenfunktion beinhaltet diese Information und beeinflusst das zweite Teilchen instantan in entsprechender Weise.

In der Interaktion mit der gesamten Umgebung - und auch mit Messgeräten, die sich davon nicht in ausgezeichneter Weise unterscheiden - ändert die Wellenfunktion in der bohmschen Deutung ihr Verhalten: Dadurch werden die Punktteilchen auf bestimmte, von der Wellenfunktion abhängige Pfade getrieben und schließlich in den Messgeräten mit bestimmten Eigenschaften registriert. Bei Bohm existiert somit kein mit Kollapsdeutungen vergleichbares quantenmechanisches Messproblem.

13.6 Wissenschaftliches Verstehen mit Bohms Theorie

Mit Hilfe des bohmschen Bildes von Punktteilchen, die auf einer Welle getragen werden und kausale Pfade zurücklegen, gelingt eine nahezu klassische Veranschaulichung der Quantenwelt. In diesem Bild gibt es keinen Kollaps, und die Korrelationen des EPR-Experiments werden kausal verursacht. Punktförmige Teilchen erreichen das Messgerät und erhalten ihre weiteren Eigenschaften aus der Interaktion des sie tragenden Feldes mit der Umgebung.

Dass die Unklassizitäten von Nichtlokalität und Nichtseparabilität in dieser Theorie bestehen bleiben - auch Maudlins Deutung muss beide Unklassizitäten akzeptieren - scheint ein Nachteil der bohmschen Deutung gegenüber der Kopenhagener Deutung zu sein, die nur das Prinzip der Separabilität aufgeben muss. Dennoch sollte zumindest erwähnt werden, dass Bohm nur partiell das Prinzip der Separabilität aufgibt, denn in seiner Deutung existieren Punktteilchen mit allzeit wohldefiniertem Ort. Auf diese Weise gibt Bohm den Objekten ihren individuellen Zustand wieder. Zwar hängen weitere Eigenschaften der Objekte von der Wellenfunktion und somit von der Umgebung ab - der Ort aber ist wohldefiniert und gibt den Objekten den Status einer unabhängigen Entität. Es hatte sich in unserer Diskussion gezeigt, dass die Kopenhagener Deutung und auch Maudlins Interpretation den Kollaps der Wellenfunktion und die EPR-Korrelationen nicht physikalisch erklären konnten, was, obgleich Maudlins Deutung immerhin kausal war, zu keinem darüber hinaus reichenden mechanistischen Verständnis des Vorganges führen konnte. Im Vergleich zwischen der Kopenhagener Deutung und der bohmschen Theorie hatte es sich bereits erwiesen, dass die bohmsche Deutung Visualisierbarkeit ermöglicht und durch die Aufhebung des Welle-Teilchen-Dualismus ein nahezu klassisches Verständnis der quantenmechanischen Vorgänge liefert. Dabei erkennen wir auch, in Übereinstimmung mit den von uns eingangs formulierten Bündelkriterien, dass die bohmsche Theorie, in der eine große Anzahl klassischer Konzepte wie Kausalität, Weltlinienpfade und individuelle Objekte verwendet werden, uns intuitiv am verstehbarsten ist. Wir erlangen durch solche Theorien ein inneres Bild, an dem wir Gedankenexperimente ausführen und ähnliche Prozesse beschreiben können.

13.6 Wissenschaftliches Verstehen mit Bohms Theorie

Es folgt aus unserer Definition von wissenschaftlichem Verstehen, dass die bohmsche Deutung gegenüber der maudlinschen als verstehbarer gelten muss. Zwar verletzt sie, wie die Deutung von Tim Maudlin, das Prinzip der Lokalität, sie erfüllt jedoch darüber hinaus mehr Bündelkriterien κ_i als die Maudlinsche Deutung. Wie wir analysiert haben, bietet Bohms Interpretation eine mechanistische und visualisierbare Deutung des Welle-Teilchen-Dualismus und ermöglicht über das Führungsfeld eine kausale Interpretation des Verhaltens visualisierbarer individueller Teilchen, die sich auf stetigen Pfaden bewegen. Nicht zuletzt gelingt nur in der bohmschen Deutung eine Analogie der Wahrscheinlichkeiten zu den Wahrscheinlichkeiten der klassischen Thermodynamik.

Gegenüber den beiden anderen Deutungen der Quantentheorie erweist sich die bohmsche Interpretation folglich, entlang des hier vorgestellten Bündelbegriffes wissenschaftlichen Verstehens, als überlegen. Dass die Theorie dennoch in der physikalischen Forschungs- und Lehrpraxis nicht den Rang einer Standarddeutung eingenommen hat, beruht auf kritischen Argumenten gegen Verborgene-Variablen-Theorien. Unter diesen ist auch der Vorwurf, dass solche Theorien kontextuell sein müssen. Diese bislang nur am Rande diskutierte Unklassizität der Quantenmechanik soll im folgenden Kapitel vorgestellt und ihre Konsequenzen für die Verstehbarkeit der bohmschen Theorie diskutiert werden.

14 Kritik an Verborgenen Variablen: Das Kochen-Specker-Theorem

Im Laufe der hier vorgelegten Arbeit hatten wir eine neue Definition wissenschaftlichen Verstehens vorgestellt. Ihre Anwendung auf drei Interpretationen der Quantenmechanik führte zu dem Ergebnis, dass sich Bohms kausale Versteckte-Variablen-Theorie als am besten verstehbar erweist. Gegen Theorien verborgener Parameter existiert jedoch ein Einwand, den wir bislang nicht diskutiert haben. Dieser Einwand wendet sich nicht gegen die nichtlokale und nichtseparable Natur der Verborgenen-Variablen-Theorien, die wir bereits als Nachteile in Bezug auf Verstehbarkeit identifiziert hatten. Selbst wenn sich eine Verborgene-Variablen-Theorie formulieren ließe, die Lokalität und Separabilität erhielte, bliebe eine Unklassizität bestehen: nämlich die so genannte *Kontextualität*. In diesem letzten Kapitel soll das Phänomen dargestellt und seine möglichen Auswege sollen diskutiert werden.

14.1 Kontextualität im EPR-Experiment

Wie wir gesehen haben, argumentierten Einstein, Podolski und Rosen gegen die Vollständigkeit der Quantenmechanik, indem sie zeigten, dass es in einer realistischen Theorie verborgene Variablen geben muss. Erst Mitte der 1960er Jahre wurde diese Debatte von John Bell¹ fortgesetzt, der mit seiner Ungleichung zeigte, dass man zwischen zwei möglicherweise unbefriedigenden Konsequenzen zu wählen habe:

¹Siehe *Bell, J.:* On the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox. *Physics* (1964), S. 195-200.

14 Kritik an Verborgenen Variablen: Das Kochen-Specker-Theorem

- Entweder eine realistische Welt mit verborgenen Parametern anzunehmen, wobei diese Welt Gesetze hätte, die nicht nur lokal gelten würden, sondern in der nichtlokale Interaktionen möglich sind. (David Bohm wählte diese Möglichkeit.)
- Oder: Die Quantenmechanik als lokale Theorie ohne realistische Interpretation zu betrachten, wie es die Kopenhagener Deutung vorschlägt.

Das Kochen-Specker-Theorem, das von Simon Kochen und Ernst Specker im Jahre 1967 formuliert wurde, bedeutet eine weitere Einschränkung für die Möglichkeit der Formulierung einer realistischen Quantenmechanik. Verborgene-Variablen-Theorien gehen davon aus, dass alle Quantenobservablen, die an einem System messbar wären, gleichzeitig scharf messbar sind und zu jedem Augenblick definierte Werte annehmen. Dieser Annahme liegt auch die Einsteinsche Separabilität zu Grunde, nach der alle Objekte mit ihren Eigenschaften unabhängig vom Rest des Universums vorliegen (außer in Augenblicken der Verschränkung). Insbesondere liegen Objekte mit ihren Eigenschaften auch unabhängig vom Messgerät vor, weswegen dieses nur Informationen über ein ohnehin wohldefiniertes Teilchen gewinnt - so die Versteckte-Variablen-Theorie.

Dabei liegt es natürlich auf der Hand, dass Messunschärfen durch das Experiment in die Theorie hineingetragen werden können. Hier geht es jedoch um eine Prinzipiendebatte, und hier nehmen Kontextualisten eine zweite Tatsache an: Wenn ein Quantensystem eine bestimmte Eigenschaft besitzt, so ist dies *nicht* unabhängig vom Messkontext zu sehen, nicht unabhängig davon also, wie diese Variable gemessen wird.

Das Kochen-Specker-Theorem² zeigt, wie im Rahmen der Quantenmechanik ein Widerspruch existiert zwischen der Annahme der Separabilität (allzeit definierte Werte der Observablen unabhängig vom Rest des Universums) und der Kontextualität (Unabhängigkeit der Variablenwerte von anderen Messun-

²Siehe hierzu *Kochen, S.* und *Specker, E.*: The Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics. *Journal of Mathematics and Mechanics* 17 (1967), S. 59-87.

14.1 Kontextualität im EPR-Experiment

gen am Objekt). In Verborgenen-Variablen-Theorien ist die Annahme notwendig, dass die Messergebnisse, auch gerade von Einzelmessungen, reale Bedeutung haben. Das heißt: Sie teilen dem Beobachter den physikalischen Zustand eines einzelnen Quantensystems mit. Die verborgenen Parameter wiederum bestimmen den physikalischen Zustand eines Einzelsystems vollständig.

Oft werden im Zusammenhang mit dem Kochen-Specker-Theorem an dieser Stelle zwei Terminologien eingeführt: Die *Wertdefiniertheit* und die *Nichtkontextualität*. Unter *Wertdefiniertheit* versteht man, dass beliebige aber feste Messwerte aus dem Spektrum der möglichen Eigenwerte zu allen Zeiten an einem Objekt fest vorliegen und das Einzelsystem determinieren. Unter *Nichtkontextualität* versteht man, dass die Messwerte *nicht* von der Art und Weise abhängen, wie dieser Wert oder die Eigenschaft des Systems ermittelt werden. Die Systemeigenschaften sind danach also nicht messungsabhängig, nicht kontextabhängig.

Das Kochen-Specker-Theorem behauptet, dass *alle Verborgenen-Variablen-Theorien kontextuell seien* oder dass eben kein solches Modell nicht kontextuell sein kann. Um diesen Satz zu beweisen, muss man sich einige Größen des Hilbertraumes, über den wir in den Eingangskapiteln gesprochen haben, verdeutlichen. Wie im Einleitungskapitel zur Quantenmechanik beschrieben, wird ein reiner Zustand in der Quantenmechanik durch einen Zustand ψ des Hilbertraumes beschrieben. Observable besitzen in diesem Raum die Form von hermiteschen Operatoren, also von Matrizen, deren Einträge nach Transposition (Spiegelung an der Geraden von links oben nach rechts unten) und komplexer Konjugation identisch mit der Ausgangsmatrix sind. Die Eigenwerte der Observablen sind mögliche Messwerte - kein Wert, der nicht Eigenwert eines hermiteschen Operators ist, kann gemessen werden.

Man kann quantenmechanische Erwartungswerte berechnen, dies sind die im Mittel auftretenden Eigenwerte von Operatoren. Bezüglich dieser gilt Linearität: Werden also zwei Operatoren addiert, so gilt für den Erwartungswert, dass dieser auch durch eine Addition der Erwartungswerte beider Operatoren ermittelt werden kann:

$$\langle \lambda A + \mu B \rangle = \lambda \langle A \rangle + \mu \langle B \rangle. \quad (14.1)$$

Nehmen wir nun Wertdefiniertheit an, so besitzt jede Eigenschaft eines Systems zu jedem Zeitpunkt einen wohldefinierten Wert, die Observablen sind also auf bestimmte Eigenwerte eingestellt; wir nennen diese bestimmten Werte der Observablen den Wert von A $W(A)$ und den Wert von B $W(B)$.

14.1.1 *SUM* und *MULT* - zwei Relationen, die zum Widerspruch führen

Die Tatsache, dass $W(A)$ und $W(B)$ wohldefinierte Werte annehmen, impliziert, dass auch $W(A+B) = W(C)$ und $W(A \cdot B) = W(D)$ wohldefiniert sind. Würde man nun beispielsweise eine Observable C messen wollen, deren Wert sich als Summe der Werte von A und B ergibt, so würde man die Observable A messen (unter der Annahme, dass der definitive Wert $W(A)$ sich exakt bestimmen lasse), außerdem den Wert von B messen und diese beiden Werte addieren, für den Wert von C gilt also:

$$W(C) = W(A) + W(B) \quad (14.2)$$

und genauso

$$W(D) = W(A) \cdot W(B). \quad (14.3)$$

Wir nennen diese Relationen *SUM* und *MULT*. Sie besagen, dass sich die Werte von Operatoren gleichermaßen addieren und multiplizieren lassen wie die Operatoren selbst.

Das Kochen-Specker-Theorem behauptet nun, dass diese Relationen nicht für beliebige komplementäre Observable der Quantenmechanik gelten. Um dies zu zeigen, muss man ein Gegenbeispiel konstruieren, wobei oft das von A. Cabello³ konstruierte Beispiel genannt wird.

Bevor wir dieses betrachten, sei noch eine Relation für so genannte Projektionsoperatoren eingeführt, die wir im Folgenden benötigen. Es sei die Menge der Vektoren (u_1, u_2, u_3, u_4) eine Orthogonalbasis des vierdimensionalen Hilbertraumes. Ein Projektionsoperator P_u auf einen der Vektoren hat dann die

³Siehe *Cabello, A. Estebaranz, A., Garca-Alcaine, G.*: Bell-Kochen-Specker theorem: A proof with 18 vectors. In: *Physics Letters A*, Volume 212, Issue 4 (1996), S. 183-187.

Form

$$P_u \mathbf{1} = |u\rangle\langle u|. \quad (14.4)$$

Von diesen Projektionsoperatoren P gibt es vier, passend zur Anzahl der Basisvektoren (auf jeden der vier Basisvektoren kann man projizieren, und die dazugehörigen Projektionsoperatoren sind paarweise verschieden). Die Projektionsoperatoren kommutieren untereinander. Jeder von ihnen hat zwei Eigenwerte: +1 und 0. Die Bedingungen *SUM* (14.2) und *MULT* (14.3) implizieren für die Projektoren folgende Relation:

$$P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = \mathbf{1}, \quad (14.5)$$

mit $\mathbf{1}$ Einsoperator (eine Matrix mit Einsen auf der Diagonalen und Nullen sonst überall).

Dass diese Relation, die wir im Folgenden benötigen, tatsächlich gilt, lässt sich schnell zeigen, indem man beweist, dass die Anwendung des $\mathbf{1}$ -Operators auf einen Vektor dasselbe Ergebnis bringt wie die Anwendung der Summe der Projektionsoperatoren.

14.1.2 Beweis

Die Anwendung des $\mathbf{1}$ -Operators auf einen Zustand $|n\rangle$ muss diesen Zustand erhalten; folglich gilt also

$$\mathbf{1}|n\rangle \stackrel{!}{=} |n\rangle, \quad (14.6)$$

und tatsächlich:

$$\begin{aligned} & |x\rangle\langle x|n\rangle + |y\rangle\langle y|n\rangle + |z\rangle\langle z|n\rangle + |q\rangle\langle q|n\rangle \\ &= n_1|x\rangle + n_2|y\rangle + n_3|z\rangle + n_4|q\rangle = |n\rangle, \end{aligned} \quad (14.7)$$

denn die letzte Summe ist gerade die Darstellung des Vektors $|n\rangle$ durch die Summe seiner Basisvektoren.

■

14.1.3 Folgerungen für $W(1)$ und $W(P_n)$

Wenn also die Summe der Projektionsoperatoren die Einheitsmatrix ergibt, $P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1$, dann muss laut Relation *SUM* (14.2) dasselbe auch für die wohldefinierten Werte der Projektionsoperatoren gelten:

$$W(P_1) + W(P_2) + W(P_3) + W(P_4) = W(1) = 1. \quad (14.8)$$

Die Tatsache, dass das letzte Gleichheitszeichen in 14.8 gilt, dass also der Wert des Einsoperators auch wirklich der Zahl 1 entspricht, sieht man daran, dass beispielsweise zwei gleichzeitig messbare Observablen R und 1 folgende Relation erfüllen:

$$W(R) \cdot W(1) = W(R \cdot 1) = W(R). \quad (14.9)$$

Das letzte Gleichzeichen gilt nur, weil $W(1) = 1$.

Analog gilt für *MULT* (14.3)

$$W(P_n) = W(P_n \cdot P_n),$$

denn sei z.B. $P_x = |x\rangle\langle x|$, so ist

$$P_x^2 = |x\rangle\langle x|x\rangle\langle x| = |x\rangle 1 \langle x| = |x\rangle\langle x| = P_x, \quad (14.10)$$

also ferner $W(P_n) = W(P_n \cdot P_n) = W(P_n) \cdot W(P_n)$ nach *MULT* (14.3). Wenn aber $W(P_n)$ gleich dem Quadrat seiner selbst $W(P_n)^2$ ist, so muss $W(P_n)$ entweder 0 oder 1 sein.

14.1.4 Der Widerspruch wird herbeigeführt

In der Summe

$$W(P_1) + W(P_2) + W(P_3) + W(P_4) = W(1) = 1 \quad (14.11)$$

muss also ein Term 1 sein und der Rest Null, sonst gäbe es einen Widerspruch.

Wir betrachten nun das Beispiel von Cabello. Darin wählt man 9 Orthogonalbasen eines *vierdimensionalen Hilbertraumes*. Jede Basis besitzt 4 Vektoren. In dem Beispiel von Cabello werden die Basisvektoren so gewählt, dass

die insgesamt 36 Vektoren (9 Basen zu je 4 Vektoren) sich aus 18 echt verschiedenen Vektoren zusammensetzen, wobei jeder der Vektoren doppelt auftreten soll. Durch diese Randbedingung sind bestimmte Korrelationen zwischen den Basen sichergestellt. Für jede einzelne Basis würde gelten:

$$W(P_1) + \dots + W(P_4) = W(1) = 1. \quad (14.12)$$

Zu jedem der 18 Vektoren $|n\rangle$ gehört ein Projektionsoperator P_n mit $P_n = |n\rangle\langle n|$. Wir wissen, dass der unter Definiiertheit angenommene Wert $W(P_n)$ entweder 0 oder 1 sein kann. Daher ist die Summe der $W(P_n)$ aller 36 Vektoren immer eine gerade natürliche Zahl, denn wenn jeder Projektor so wie jeder Vektor n zweimal auftaucht, so sind in der Summe

$$W(P_1) + W(P_1) + W(P_2) + W(P_2) + \dots + W(P_{18}) + W(P_{18}) \quad (14.13)$$

entweder zwei Nullen oder zwei Einser enthalten.

Dies führt allerdings zum Widerspruch, denn diese 36 Vektoren sind zugleich 9 Basen (mit je 4 Teilnehmern), von denen jedes einzelne Viererpaar in der Summe eins ergeben soll, und nicht nur die Summe über alle Vektoren. Es gilt also beispielsweise wegen *SUM* (14.2):

$$W(P_1) + W(P_4) + W(P_{11}) + W(P_{12}) = W(1) = 1, \quad (14.14)$$

mit n_1, n_4, n_{11}, n_{12} Basis, wodurch die große Summe aller Projektoren insgesamt 9 ergeben müsste und nicht eine gerade natürliche Zahl.

14.2 Folgerung

Wir haben im letzten Schritt angenommen, dass die Relation *SUM* (14.2) gilt, dass also die Werte von Operatoren sich gleichermaßen addieren lassen wie die Operatoren selbst. Dies war die *mathematische Formulierung der Annahme der Wertdefiniiertheit*, wonach zu allen Zeiten die Observablen definierte Werte annehmen, die dann die normalen Additions- und Multiplikationsgesetze der Quantenmechanik befolgen sollten. Diese Annahme führte jetzt zum Widerspruch: Folglich kann innerhalb der Quantenmechanik nicht angenommen werden, dass Objekte allzeit wohldefinierte Eigenschaften besitzen.

14.2.1 Der Widerspruchsbeweis in Worten

Es existiert eine einfachere Veranschaulichung des eben mathematisch vorgeführten Widerspruches. Dass die Summe aller Werte der Projektionsoperatoren 1 ergibt,

$$W(P1) + \dots + W(P4) = 1, \quad (14.15)$$

bedeutete ja, dass nur einer der Werte der Projektoren 1 sein darf und die anderen Null sein müssen, *wenn Wertedefiniertheit vorliegt*.

Es sei zum Zwecke der Anschauung an dieser Stelle die Zahl 1 mit der Farbe *weiß* identifiziert und die Nullen mit der Farbe *schwarz*. Dann folgt, dass immer nur ein Eigenvektor einer vierdimensionalen Basis die Farbe weiß (Eigenwert 1) annimmt und die anderen drei Vektoren schwarz sind (Projektoren ergeben Eigenwert Null).

Bei den neun Basen des vorangehenden Beispiels sollte also stets ein Vektor weiß sein und die anderen schwarz. Das macht bei den 36 Vektoren 9 weiße Vektoren. Andererseits aber tritt jeder Vektor zweimal auf. Folglich müsste die Anzahl von weißen Vektoren eine gerade Zahl sein. Dies führt nur dann (!) zum Widerspruch, *wenn man Nichtkontextualität annimmt*.

■

Nimmt man hingegen an, dass ein bestimmter Vektor in einer anderen Basis eine andere Farbe annehmen kann (dass er also vom Kontext abhängt in seiner Farbe), so hinge die 'Farbe' - der Eigenwert des Vektors - von der Basis, also beispielsweise vom Messaufbau, ab. Will man eine solche Abhängigkeit jedoch vermeiden, so müssen dieselben Vektoren in allen Umständen auch dieselben Eigenwerte besitzen - die selbe Farbe - was dann zum Widerspruch führt.

Im ersten Teil dieses Widerspruches verwendet man also die *Wertdefiniertheit* (Gleichung *SUM* (14.2)) und anschließend für den Widerspruch die *Kontextualität*.

14.2.2 Versteckte-Variablen-Theorien sind kontextuell

Kochen und Specker diskutieren in ihrer Veröffentlichung im Anschluss, dass die Wertzuordnung $W(A)$ kontextabhängig sein könnte. Das würde bedeu-

14.3 Drei klassische Prinzipien stehen auf dem Spiel

ten, dass jede der 9 Basen des vierdimensionalen Hilbertraumes einer anderen Messapparatur entsprechen würden. Die ‘unter der Quantenmechanik liegende Realität der verborgenen Variablen’ könnte dann also von der jeweiligen Messapparatur abhängen.

Nur dann also wären die 9 Basen gleichzeitig messbar und nur dann gälte die *SUM*-Relation (14.2). Wären die 9 Basen nicht kompatibel, so gälte *SUM* nicht, und das Beispiel wäre kein Gegenbeispiel zu *SUM*.

Das Kochen-Specker-Theorem widerlegt also nur kontextunabhängige Versteckte-Variablen-Theorien. Hängen die Basen aber vom Kontext ab, so sind Versteckte-Variablen-Theorien formulierbar.

Eine Versteckte-Variablen-Theorie, die kontextabhängig ist, würde, übersetzt in obiges zweites Beispiel, beinhalten, dass alle 9 Basen des vierdimensionalen Hilbertraumes immer ein weißes und drei schwarze Beine haben, dass aber der weiß gefärbte Vektor einer Basis auch schwarz sein kann, wenn er in einer anderen Basis auftaucht. Eigenwerte wären dann also verschieden, je nachdem, welche Basis gewählt würde - und dies geschähe beispielsweise durch unterschiedliche Messaufbauten. In einem solchen Falle hinge die von uns beobachtete ‘Realität’ vom Messaufbau ab.

14.3 Drei klassische Prinzipien stehen auf dem Spiel

Der Summen- und Produktregel (*SUM* (14.2) und *MULT* (14.3)) liegt das so genannte *Funktionale Kompositionsprinzip* zugrunde. Diese sehr allgemeine mathematische Aussage über die Funktionen f hermitescher Operatoren A , also $f(A)$, lässt sich nicht aus dem Formalismus der Quantenmechanik herleiten, wohl aber aus statistischen Formeln motivieren.

Das funktionale Kompositionsprinzip besagt, dass der Wert einer Funktion einer Observablen dasselbe ist wie die Funktion des Wertes der Observablen, dass es also irrelevant ist, wann ich den Operator bezüglich eines Zustands auswerte. Es ist also dasselbe, ob ich zuerst den Operator bezüglich eines Zustands auswerte und die Funktion auf den so erhaltenen Eigenwert anwende

14 Kritik an Verborgenen Variablen: Das Kochen-Specker-Theorem

- oder zuerst die Funktion auf den Operator und diesen neuen hermiteschen Operator bezüglich eines Zustands auswerte:

$$W(f(A)) = f(W(A)) \quad (14.16)$$

(W steht für den Eigenwert). In der Quantenmechanik ist diese Gleichung bekannt und Teil des Formalismus in der Form der Wahrscheinlichkeitsverteilung für eine Variable, wonach gilt, dass die Wahrscheinlichkeit $W(f(A))$ identisch der Wahrscheinlichkeit von $f(W(A))$ ist.

Man kann zeigen, dass sich das Funktionale Kompositionsprinzip aus der statistischen Form der Quantenmechanik herleiten lässt, wenn man darüber hinaus drei klassische Annahmen macht. *Die drei klassischen Prinzipien A, B, C sind, wie wir sehen werden, diejenigen Annahmen, von denen eine Verborgene-Variablen-Theorie mindestens eine aufgeben muss, um der unklassischen Kontextualität des Kochen-Specker-Theorems zu entkommen und eine nichtkontextuelle Theorie zu ermöglichen:*

- A: *Wertrealismus* (hinter jeder berechenbaren Wahrscheinlichkeit steckt eine Observable)
- B: *Wertdefiniertheit* (alle Werte von Observablen sind allzeit an Zuständen definiert)
- C: *Nichtkontextualität* (Unabhängigkeit der Messwerte von der Messweise)

Unter Annahme der Prinzipien A, B und C lässt sich das Kompositionsprinzip folgendermaßen aus der statistischen Form herleiten: Es sei A eine Observable am System $|\psi\rangle$. Gilt Wertdefiniertheit, so besitzt das System zu allem Zeiten einen wohldefinierten Wert $W(A)$, wobei gelte, dass

$$I : W(A) = a. \quad (14.17)$$

Auf diesen Wert können wir eine Funktion f anwenden, wobei

$$II : f(a) = f(W(A)) = a_1. \quad (14.18)$$

14.4 Lösung A: Aufgabe des Werterealismus

Für eine Funktion $f(W(A))$ gilt in der Quantenmechanik die Beziehung:

$$III : \text{Wahrscheinlichkeit}(f(W(A))) = \text{Wahrscheinlichkeit}(W(f(A))). \quad (14.19)$$

Mit Hilfe des Werterealismus kann man nun davon ausgehen, dass dem Operator $f(A)$ auch eine Observable entspricht. Setzen wir II in III ein, so

$$\text{Wahrscheinlichkeit}(a_1) = \text{Wahrscheinlichkeit}(W(f(A))) \quad (14.20)$$

woraus folgt

$$W(f(A)) = a_1 = f(W(A)). \quad (14.21)$$

Nimmt man zuletzt noch Nichtkontextualität hinzu, so ist diese Observable nicht von der Messweise abhängig, sondern eindeutig in allen Messumständen.

14.4 Lösung A: Aufgabe des Werterealismus

Auf die unklassische Kontextualität von Verborgenen-Variablen-Theorien kann man auf drei verschiedene Arten reagieren. Entweder man entscheidet sich dazu, A : Werterealismus aufzugeben, oder B : Wertedefiniiertheit zu verwerfen, oder C : Man akzeptiert Nichtkontextualität als Eigenschaft von Versteckten-Variablen-Theorien (dies war die von Kochen und Specker präferierte Wahl).

Die Annahme des Werterealismus kam bei der Motivation des Kompositionsprinzip von der statistischen Form der Quantenmechanik dort ins Spiel, wo man in der Gleichung

$$III : \text{Wahrscheinlichkeit}(f(W(A))) = \text{Wahrscheinlichkeit}(W(f(A))) \quad (14.22)$$

den auftauchenden Term $f(A)$ als Observable interpretierte. Nun kann man jedoch annehmen, dass nicht zu jedem hermiteschen Operator, also nicht zu jeder Zahl, die sich aus einer Wahrscheinlichkeitsverteilung errechnen lässt, auch eine Observable gehört.

Hier taucht jedoch ein Motivationsproblem auf. Warum sollte die Summe oder das Produkt zweier gleicher Observablen (einer Observablen mit sich selbst, also $f(A)$) keine Observable mehr sein? Aus der Physik sind wir es

gewöhnt, dass wir mit beobachtbaren Größen rechnen und daraus letztlich wieder eine physikalische beobachtbare Größe resultiert. Die Aufgabe des Werterealismus führt also zu schwerwiegenden Motivationsproblemen und wird daher nur selten angewendet, um die Kontextualität Verborgener-Variablen-Theorien zu umgehen.

14.5 Lösung B: Aufgabe der Wertedefiniertheit

Jede Versteckte-Variablen-Theorie nimmt an, dass die Werte von Observablen an Quantenobjekten zu jedem Zeitpunkt feststehen. Würde man zur Rettung solcher Theorien also gerade diese Wertedefiniertheit verwerfen wollen?

Hier nehmen manche Interpretationen der Quantenmechanik, wie die Modalinterpretation, an, dass die Observablen der Quantenmechanik nicht unbedingt mit den Observablen der physikalischen Welt übereinstimmen. Die Idee ist, dass diejenigen physikalischen Observablen, die nicht mit denen der Quantenmechanik übereinstimmen, definierte Werte besitzen - die quantenmechanischen Observablen jedoch nicht.

Die Modalinterpretationen geraten an dieser Stelle jedoch in Schwierigkeiten, da gezeigt werden kann, dass in jedem sinnvollen Kontext diese 'partiellen Wertedefiniertheit' zu einer 'vollen Wertedefiniertheit' ausgeweitet werden muss, so dass wieder Kochen-Specker-Theoreme greifen.⁴ Auch die Bohmsche Quantenmechanik nimmt eine solche partielle Wertedefiniertheit an. In dieser Deutung ist nur der Wert der Ortsobservablen zu allen Zeiten definiert.

Es herrscht in der Literatur Unklarheit darüber, ob die Bohmsche Deutung mit dieser Form der partiellen Aufgabe der Wertedefiniertheit dem Problem der Kontextualität entkommt und sie den Status einer nichtkontextuellen Verborgenen-Variablen-Theorie erreicht. So meint beispielsweise der indische Physiker Dipankar Home gezeigt zu haben, dass die Verteilung der Ortsvariablen nach $|\psi|^2$ zusammen mit der partiellen Aufgabe der Wertedefiniertheit

⁴Siehe hierzu *Bacciagaluppi, G.:* Virtual Reality: Consequences of No-Go Theorems for the Modal Interpretation of Quantum Mechanics. In: *Language, Quantum, Music*. Synthese Library 281 (1995).

14.6 Lösung C: Akzeptanz der Kontextualität

hinreichend und notwendig für Nichtkontextualität sei.⁵ Andererseits bleibt unklar, inwiefern Bacciagaluppis Beweis, dass jede partielle Wertedefiniertheit in ‘sinnvollen’ Kontexten zu einer vollständigen Wertedefiniertheit erweitert werden muss, auch in Bezug auf die Bohmsche Theorie zutrifft. Oliver Passon wiederum geht davon aus, dass die Bohmsche Deutung kontextuell ist und begründet dies mit der Verformung der Wellenfunktion durch eine Messapparatur, wodurch das Punktteilchen in seiner Bahn verändert wird. Alle Eigenschaften außer der des Ortes hängen von der konkreten Messsituation, also vom Kontext ab, was die Theorie manifest kontextuell mache.

Zunächst unabhängig davon, ob Bohms Theorie kontextuell ist, seien hier verschiedene Wege aus der Kontextualität der Versteckten-Variablen-Theorien vorgestellt.

14.6 Lösung C: Akzeptanz der Kontextualität

Akzeptiert man jedoch die Folgerungen des Kochen-Specker-Theorems, und dies ist der dritte Ansatz, eine Versteckte-Variablen-Theorie zu konstruieren, so akzeptiert man, dass jede solche Theorie kontextuell sein muss. In diesem Fall wäre keine Observable jemals eindeutig. Wären also zwei Observable $f(A)$ und $h(B)$ identisch, obwohl A und B nicht kommutieren, so gälte bei Kontextualität, dass man die Observable $f(A)$ nur bestimmen könnte, indem man A misst, während man $h(B)$ bestimmt, indem man B misst - eine Observable, die inkompatibel zu A ist und nicht gleichzeitig mit dieser gemessen werden kann.

Nimmt man Kontextualität an, so muss man heute in der Literatur zwei große Zweige berücksichtigen, die sich in der Theorie entwickelt haben: kausale und ontologische Kontextualität. Eine Observable ist *kausal kontextabhängig*, wenn sie kausal sensitiv auf die Art und Weise reagiert, mit der sie gemessen wird. Man betrachte dazu den Operator $f(A) = h(B)$. Die Messung von $f(A)$ kann in einem kontextabhängigen Modell unterschiedliche Werte erbringen, je nachdem, ob ich mit einem A -Apparat messe oder mit einem B -Apparat,

⁵Siehe Home, D.: Position and contextuality in Bohm’s causal completion of quantum mechanics. Physics Letters A, Volume 190, Issues 5-6, August 1994, S. 353-356.

14 Kritik an Verborgenen Variablen: Das Kochen-Specker-Theorem

weil diese beiden Observablen auf verschiedene Weisen physikalisch gemessen werden und somit das Quantensystem unterschiedlich kausal beeinflussen.

Bei einer kontrafaktischen Analyse stellt man fest: Wäre Apparat A nicht genommen worden, so wäre der Wert $W(f(A))$ nicht gemessen worden. In dieser kontrafaktischen Weise ist also der ‘Messapparat für die Observable A ’ *kausal verantwortlich für den Messwert*. Damit wird allerdings die Annahme widerlegt, dass Quantenzustände schon Werte vor der Messung besitzen, die durch die Messung festgestellt werden. In diesem Modell kreiert der Messapparat das Ergebnis, bringt es kausal hervor bzw. beeinflusst es kausal.

Die *ontologische Kontextualität* wiederum geht davon aus, dass man bei einem Operator $f(A)$ oder $h(B)$ (wieder mit $f(A) = h(B)$) auf die Observable blicken muss, die hinter einem zusammengesetzten Operator steckt. Ein bestimmter Operator $f(A)$ besitzt dann so viele physikalische Auftrittsformen, wie es Observable gibt, aus denen er sich zusammensetzen lässt. Dies lässt sich motivieren, indem man beispielsweise annimmt, dass der Wert von $f(A)$, also $W(f(A))$, insgeheim von $W(A)$ abhängt.

Hierbei taucht jedoch das Problem auf, dass man nicht weiß, wie $W(A)$ in einem B -Experiment aussähe. Ist $W(A)$ dann anders oder genauso? Überdies stellt sich die Frage, ob man zu diesen Problemen überhaupt ein Experiment konstruieren kann, das solche Fragen klären könnte. Es bleibt die unklassische und möglicherweise unbefriedigende Problematik bestehen, dass es nur noch Sinn machen würde, von einem Wert $W(f(A))$ zu sprechen, wenn ein A -Messgerät in der Nähe ist, wohingegen der Wert sonst undefiniert wäre.

14.7 Ergebnis

Das Kochen-Specker-Theorem zeigt, dass jede Versteckte-Variablen-Theorie kontextuell sein muss. Jede solche Theorie muss die Nonkontextualitätsannahme verletzen, die Bell folgendermaßen formulierte: "Measurement of an observable must yield the same value independently of what other measurements may be made simultaneously."⁶

Bezüglich der Verletzung jener Nichtkontextualitätsforderung durch Verborgene-Variablen-Theorien muss man folglich einen von zwei Standpunkten beziehen: Entweder man gibt die Hoffnung auf eine nichtkontextuelle (also klassische) Versteckte-Variablen-Theorie auf und akzeptiert Kontextualität. Damit würde man zugeben, dass Observable keine Wertedefiniertheit besitzen, also nicht zu allen Zeiten verborgene wohldefinierte Werte der Observablen an physikalischen Zuständen vorliegen. Die damit verbundenen Probleme wie das Messproblem oder die beobachterabhängig definierten Zustände - die man gerade durch die Verborgene-Variablen-Theorie beheben hatte wollen - blieben somit bestehen.

Die andere Möglichkeit des Umgangs mit der Kontextualität ist, gerade solche Versteckten-Variablen-Theorien zu konstruieren, die nicht kontextuell sind. Wie oben argumentiert, müsste man dazu jedoch entweder die Annahme des Werterealismus fallen lassen (was wir als nur schwer motivierbar verworfen haben), oder für eine Untermenge der Observablen die Hoffnung auf Wertedefiniertheit des Versteckte-Variablen-Programms aufgeben. Da in David Bohms Theorie nur die Ortskoordinate wohldefiniert ist, könnte mit dieser Deutung der Quantenmechanik eine Konstruktion einer nichtkontextuellen Versteckten-Variablen-Theorie gelungen sein. Ob dies allerdings tatsächlich der Fall ist, bleibt jedoch, wie oben erwähnt, bislang umstritten.

Es scheint also, als könne man nicht problemlos eine klassische Verborgene-Variablen-Theorie konstruieren - zumindest nicht ohne weitere Nichtklassizitäten zu akzeptieren, die der Motivation bedürfen. Andererseits ist Kontextualität nicht allein ein Problem Versteckter-Variablen-Theorien, denn beispielsweise liegt sowohl in der Kopenhagener Deutung als auch in Tim Maud-

⁶Bell, J.: *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, S. 9.

14 Kritik an Verborgenen Variablen: Das Kochen-Specker-Theorem

lins kausaler Deutung der Quantenmechanik eine gewisse Form der Kontextualität vor, insofern als bei Maudlin die Wahrheitswerte über den Ablauf und die Ergebnisse des Experiments von der Wahl der Hyperebene abhängen. In der Kopenhagener Deutung ergibt sich die Kontextualität aus der Tatsache, dass wohldefinierte Werte für Eigenschaften eines quantenmechanischen Zustands (der vollständig durch ψ beschrieben wird) erst durch die Wahl eines Messkontextes gewonnen werden.

Wir kommen somit zu dem Schluss, dass Kontextualität unter Umständen ein Problem für die Bohmschen Theorie darstellt. Dem stimmt Oliver Passon zu, der die Kontextualität der Bohmschen Theorie im Verhalten der Wellenfunktion bei Anwesenheit eines Messapparates manifestiert sieht.

Kontextualität bedeutet für die Bohmsche Theorie, dass die in ihr auftauchenden Eigenschaften von Objekten vom Messkontext abhängen und jene Eigenständigkeit verlieren, die die Verborgene-Variablen-Theorie ihnen gerade hatte zuweisen wollen. Dieses unklassische Problem existiert jedoch auch in den anderen beiden von uns betrachteten Interpretationen, so dass sich aus der Tatsache, dass die Bohmsche Theorie möglicherweise das Bündelkriterium der Kontextunabhängigkeit verletzt, kein Nachteil für die Bohmsche Theorie in Bezug auf wissenschaftliches Verstehen gegenüber den anderen Deutungen ergibt.

15 Zusammenfassung

Obwohl die Quantenmechanik eine der erfolgreichsten Theorien der Physik darstellt, bereitet sie uns Interpretationsprobleme und fordert unsere Vorstellungskraft heraus. In der hier vorliegenden Arbeit wurde die Frage gestellt, woran es liegt, dass die Quantenmechanik sich unserem Verständnis zu entziehen scheint und oft, wie beispielsweise von Richard Feynman, als unverständlich bezeichnet wird: "I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics."¹

Als eines der rätselhaftesten Probleme der Quantenmechanik wurde das 1935 von Albert Einstein, Nathan Rosen und Boris Podolski formulierte Gedankenexperiment - das EPR-Paradoxon - vorgestellt. Darin bewegen sich zwei verschränkte Teilchen voneinander fort und zeigen auch bei raumartig entfernter Messung stets korreliertes Verhalten. Für Einstein, Podolski und Rosen sollte mit diesem Gedankenexperiment die Unvollständigkeit der Quantenmechanik bewiesen werden - sie vermuteten, dass wir die Quantenwelt noch nicht verstanden hätten und eine Theorie existieren würde, die uns die Korrelation mechanistisch-prozessural verstehen ließe.

15.1 Bündelbegriff wissenschaftlichen Verstehens

Um die Frage nach dem Verstehen der Quantenmechanik und insbesondere des EPR-Experiments genauer zu analysieren wurden in dieser Arbeit zunächst verschiedene Theorien wissenschaftlichen Erklärens betrachtet, wie beispielsweise das *deduktiv-nomologische Modell Carl Gustav Hempels*, *Wesley Salmons kausal-mechanistisches Modell* oder *Philip Kitchers vereinheitlichende*

¹Feynman, R.: The Character of Physical Law. Modern Library 1965, Kap. 6, S. 123.

15 Zusammenfassung

Erklärung. Dabei zeigte es sich, dass eine große Spannweite von Theorien des Erklärens existiert, zwischen denen kein Konsens besteht.

In der hier vorgestellten Analyse erwiesen sich sowohl die kausale als auch die vereinheitlichende Erklärung zwar als hilfreich, nicht aber als notwendig oder hinreichend für Verstehen. Weder das Prinzip der Kausalität noch das der Vereinheitlichung stellen einen absoluten Standard für die Verstehbarkeit wissenschaftlicher Theorien dar. Stattdessen wurde in dieser Arbeit ein sich für uns als notwendig und hinreichend darstellendes Kriterium für Verstehen (K) verwendet:

K: Eine Theorie ist für einen Wissenschaftler in einem gegebenen Kontext dann verstehbar, wenn er qualitative Vorhersagen treffen kann, ohne exakte Rechnungen durchzuführen.

Dieser Verstehensbegriff erweist sich insofern als pragmatisch, als er den Kontext des Wissenschaftlers berücksichtigt - wie beispielsweise dessen gesellschaftliche oder historische Umgebung beziehungsweise sein Wissen und seine persönlichen Überzeugungen. Zu Letzteren zählen diejenigen Forderungen an eine Theorie, die ein Wissenschaftler individuell als wesentlich gewichtet. Je- ne in dieser Arbeit so genannten *Bündelkriterien* κ_i beinhalten die Prinzipien der *Vereinheitlichung*, der *Kausalität*, der *Visualisierbarkeit*, den *Individuenbegriff*, *Stetigkeit*, *Analogien*, *Lokalität*, *Separabilität*, *Kontextunabhängigkeit*, *Symmetrien*, *Lorentzinvarianz*, *Einfachheit* und die Möglichkeit der Identifikation von *Mechanismen*. Diese Liste von Kriterien erhebt dabei keinen Anspruch auf Vollständigkeit, beinhaltet aber doch *alle wesentlichen in modernen physikalischen Theorien auftretenden Prinzipien*.

In der vorliegenden Arbeit wurde argumentiert, dass wir immer dann von einer verstehbaren Theorie sprechen, wenn möglichst viele Bündelkriterien auf die Theorie zutreffen. Es zeigte sich dabei nicht als notwendig für Verstehen, dass alle möglichen κ_i zutreffen. *Ebenso wenig konnte irgend einem Kriterium aus der Menge der Bündelkriterien ein privilegierter Status zugewiesen werden.*

Somit ermöglicht die in dieser Arbeit vorgeschlagene Definition wissen-

15.1 Bündelbegriff wissenschaftlichen Verstehens

schaftlichen Verstehens eine Antwort auf die zuvor geäußerte Kritik an den Theorien des Erklärens, die nach Meinung der Autorin nur unzureichend motivierten, wie aus ihnen wissenschaftliches Verstehen hervorgehen soll, denn die Bündelkriterien κ_i (unter denen auch die für Erklärungen wesentlichen Prinzipien der Kausalität oder Vereinheitlichung zu finden sind) fungieren nun als Hilfsmittel, um für individuelle Forscher mit unterschiedlichem Kontext wissenschaftliches Verstehen im Sinne des notwendigen und hinreichenden Kriteriums K zu *ermöglichen* - wobei wegen der Gleichgewichtung der κ_i gilt, dass die Theorie als umso verstehbarer gelten darf, je mehr Bündelkriterien auf sie zutreffen.

Ferner konnte das von Einstein, Rosen und Podolski empfundene Unbehagen im Zusammenhang mit der Quantenmechanik entschlüsselt werden: Das Unbehagen stellte sich nicht als das 'Nicht-Verstehen' der Quantentheorie heraus, das die Forscher möglicherweise selbst empfanden - denn Verstehen im Sinne von K war bezüglich des EPR-Experiments damals wie heute möglich -, sondern als individuelle Überzeugung, dass es eine weitere Theorie geben müsse, die mehr Kriterien κ_i berücksichtige als die damals gebräuchliche Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik aufwies.

Mit Hilfe der hier vorgeschlagenen Definition von Verstehen wurden in dieser Arbeit im Folgenden drei Deutungen der Quantentheorie verglichen, nämlich die *Kopenhagener Deutung*², die *kausale Kollapsdeutung von Tim Maudlin*³ und die *kausale Non-Kollapsdeutung von David Bohm*⁴. *Diese Theorien berücksichtigen - bei empirischer Äquivalenz - jeweils unterschiedliche und unterschiedlich viele Bündelkriterien.* Nach Einführung für die Quantenmechanik wesentlicher Begriffe und Konzepte war das Ziel des Vergleiches, die in den jeweiligen Theorien berücksichtigten Bündelkriterien zu identifizieren und zu diskutieren. So sollte diejenige Interpretation herausgefunden werden, die nach der hier vorgestellten Definition wissenschaftlichen Verstehens das beste Verstehen des EPR-Experiments ermöglicht.

²Beispielsweise in: *Bohr*, N.: Atomic Theory and the Description of Nature. Nature 133 (1934), S. 962-964.

³*Maudlin*, T.: Quantum Non-Locality and Relativity. Blackwell Publishing, Oxford 1994.

⁴*Bohm*, D.: A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of 'Hidden' Variables. In: Physical Review 85, Nr. 2 (1952), S. 166-179.

15 Zusammenfassung

Es sollte letztlich jene Theorie als am besten verstehbar bezeichnet werden, auf die die meisten Bündelkriterien zutreffen: in dem Sinne nämlich, dass eine solche Theorie eine möglichst große Zahl von Wissenschaftlern mit unterschiedlichen Kontexten und unterschiedlich gewerteten Bündelkriterien zu einer qualitativen Vorhersage befähigt.

15.2 Eine Deutung reüssiert

Mit der Kopenhagener Deutung und der Interpretation von Tim Maudlin wurden in dieser Arbeit zunächst *zwei Kollapsdeutungen einander gegenübergestellt*. Es zeigte sich, dass in Maudlins Deutung, neben dem auch in der Kopenhagener Deutung verletzten Prinzip der Separabilität, zusätzlich auch das Prinzip der Lokalität aufgegeben werden musste. Außerdem erwies sich Maudlins Interpretation wegen der Annahme einer großen Anzahl von Hyperebenen, entlang derer jeweils ein Kollapsprozess stattfinden soll, als komplizierter, weswegen das Bündelkriterium der Einfachheit aufgegeben wurde. In **Maudlins Deutung** sind also folgende Kriterien verletzt:

- ↘ *Das Prinzip der Lokalität*
- ↘ *Das Prinzip der Einfachheit*

Diese beiden Nachteile für wissenschaftliches Verstehen wurden im Vergleich der Interpretationen jedoch dadurch aufgewogen, dass die maudlinsche Deutung den Kollaps als mechanistischen Prozess auffasst und entlang des in dieser Arbeit verwendeten Kausalbegriffs als 'kausal' gelten kann. Darüber hinaus kann die Theorie - durch die flemingsche Hyperebenenhypothese - auch lorentzinvariant formuliert werden:

- ↗ Kollaps als mechanistischer Prozess
- ↗ Theorie kausal
- ↗ Möglichkeit einer lorentzinvarianten Formulierung.

Beide Theorien, die Kopenhagener Deutung und Maudlins Interpretation, sind, wie in Kapitel 14 diskutiert, kontextabhängig. Die Ergebnisse von Messungen hängen in diesen Theorien also vom Messkontext ab und lassen sich nicht als unabhängige Eigenschaften quantenmechanischer Objekte interpretieren.

Auch bezüglich der restlichen Bündelkriterien sind beide Deutungen gleichwertig.

Letzten Endes erwies sich die maudlinsche Deutung somit, trotz ihrer Nachteile, wegen der höheren Zahl berücksichtigter Bündelkriterien als der Kopenhagener Interpretation in Bezug auf wissenschaftliches Verstehen überlegen. Nachdem die Mmaudlinsche Deutung gegenüber der Kopenhagener Deutung folglich gewonnen hatte, wurde sie mit der bohmschen Theorie verglichen.

Die bohmsche Theorie als eine Non-Kollaps-Theorie versteckter Variabler erwies sich schließlich ebenso wie die maudlinsche Deutung⁵ als nichtlokal. Gegenüber der maudlinschen konnte die **bohmsche Deutung** insgesamt nur einen Nachteil in Bezug auf die Bündelkriterien verzeichnen, denn der Ansatz erlaubt

↘ *keine lorentzinvariante Formulierung des EPR-Experiments.*

Darüber hinaus jedoch identifizierte die vorliegende Arbeit Bündelkriterien, die, anders als in der maudlinschen Deutung, in der bohmschen Interpretation berücksichtigt werden: Beispielsweise erfüllt Bohms Deutung das Prinzip der Einfachheit, insofern als die bohmsche Theorie nicht die flemingsche Hyperebenenthese verwendet und sie formal äquivalent ist zur Kopenhagener Deutung. Außerdem gelingt mit dieser Theorie, *durch Aufhebung der Welle-Teilchen-Dualität, eine nahezu klassische Visualisierbarkeit*: In dieser Deutung existieren individuierte Punktteilchen, die wie Staubkörner auf einer Wasserwelle (hier: dem Führungsfeld ψ) reiten. Durch die Wirkung des Feldes (über eine Kraft) auf das Teilchen gelingt in der bohmschen Deutung eine kausale Interpretation stetiger Teilchentrajektorien. Darüber hinaus erwiesen sich auch die Wahrscheinlichkeiten als analog zu klassischen Wahrscheinlichkeiten begreifbar, insofern als die bohmsche Theorie das Absolutquadrat der Wellenfunktion analog einer thermodynamischen Dichte auffasst.

Durch die höchste Anzahl berücksichtigter Bündelkriterien - Kausalität und Mechanismen (wie auch in der maudlinschen Deutung), dann aber auch (anders als bei Maudlin) die Möglichkeit der Identifizierung von Individuen (deren Ortskoordinate wohldefiniert ist), die Verwirklichung stetiger Pfade und

⁵Damit stehen sie aber im Gegensatz zur Kopenhagener Deutung.

15 Zusammenfassung

die Ermöglichung von Analogien, z. B. beim Begriff der Wahrscheinlichkeit - wurde zuletzt die **bohmsche Theorie** als von den drei betrachteten Interpretationen am besten verstehbar identifiziert. Ihre Vorteile sind:

- Erhaltung der Einfachheit
- Visualisierbarkeit
- Existenz stetiger Trajektorien
- Identifikation individueller Objekte
- Analogie zu klassischen Wahrscheinlichkeiten.

Dass das Bündelkriterium der Symmetrie in der hier vorgestellten Diskussion nicht erwähnt wurde, liegt daran, dass sich alle drei Interpretationen auf denselben Formalismus beziehen und keine der Interpretationen die in den mathematischen Strukturen vorhandenen Symmetrierelationen verletzt. Dennoch könnte die ungleiche Behandlung von Ort und Impuls in der Bohmschen Quantenmechanik kritisiert werden. Während in der bohmschen Deutung dem Ort eine spezielle Rolle zukommt, werden alle anderen Observablen kontextualisiert und können nicht in Form von Eigenschaften dem Punktteilchen zugeordnet werden. Der Grund dafür liegt darin, dass die bohmsche Theorie, anders als die klassische Mechanik, nicht Orte und Geschwindigkeiten spezifizieren muss, um die Bewegungsgleichung von Teilchen zu formulieren, sondern nur der Angabe der Teilchenorte bedarf, denn die Führungsgleichung ist eine Gleichung erster Ordnung (sie erfordert nur eine Anfangsbedingung). Größen wie Energie oder Impuls sind in einer Theorie erster Ordnung nicht fundamental, sondern abgeleitete Größen. Die symmetrische Gleichbehandlung einer fundamentalen Größe mit einer abgeleiteten und von der Beobachtungssituation abhängigen Eigenschaft muss also in der bohmschen Theorie nicht gefordert werden.

Hier zeigt sich auch, dass Symmetrien, die in der klassischen Physik gelten, nicht unbedingt auch in der Quantenphysik gelten müssen. Beispielsweise wird in der Dynamik des Standardmodells der Teilchenphysik die Symmetrie unter Raumspiegelung (Parität) verletzt. Obwohl diese Symmetrie in der klassischen Physik erhalten ist, gilt ihre Verletzung im Standardmodell nicht als Argument gegen die Validität des Standardmodells. Wohl aber gilt die Symmetrieverletzung, in Folge unseres Verstehensbegriffes, als Erschwernis für das Verstehen

der Theorie.

Oliver Passon hat Bohms Theorie dafür kritisiert, eine weitere Symmetrie zu verletzen:⁶ Nämlich die Symmetrie zwischen actio und reactio der Wellenfunktion ψ . Diese wirkt mit einer Kraft auf das Punktteilchen ein, während das Punktteilchen jedoch umgekehrt nicht auf die Wellenfunktion zurückwirkt. So weist Passon darauf hin, dass eine ähnliche Asymmetrie (bezüglich des absoluten Raumes) von Einstein kritisiert wurde:

Kritiker der Bohmschen Mechanik erinnern gerne daran, dass Einstein seine Ablehnung des Konzeptes eines absoluten Raumes genau an einer entsprechenden Asymmetrie festgemacht hat: Der absolute Raum wirkt auf physikalische Abläufe, ohne dass diese eine Rückwirkung auf ihn ausüben. Dieser Punkt erscheint in der Tat bedenkenswert und ein echter Makel an der Bohmschen Mechanik.⁷

Akzeptierte man diese Kritik, so wären in der bohmschen Deutung weniger Symmetrien enthalten als in der maudlinschen. Dennoch würde die bohmsche Theorie weiterhin aufgrund der großen Anzahl in ihr berücksichtigter Bündelkriterien als verstehbarer gelten.

Da die bohmsche Theorie eine Versteckte-Variablen-Theorie ist, wurde zuletzt das so genannte Kochen-Specker-Theorem diskutiert, das oft als Einwand gegen Theorien mit verborgenen Parametern vorgebracht wird, insofern als es beweist, dass mit einer solchen Theorie Kontextualität einhergeht. In dieser Arbeit wurde jedoch argumentiert, dass diese Kontextualität auch Maudlins und die Kopenhagener Deutung betrifft und somit nicht als Argument gegen die Verstehbarkeit der bohmschen Deutung gegenüber den anderen Interpretationen verwendet werden kann. Somit erweist sich die bohmsche Deutung auch nach aller Kritik als diejenige der drei hier betrachteten Interpretationen, mit der in der Quantenphysik das beste Verstehen gelingt.

⁶Vgl. *Passon, O.*: Bohmsche Mechanik. Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main, 2004.

⁷Ebd., S. 112.

15 Zusammenfassung

Dass mit der bohmschen Theorie keine klassische Darstellung der Quantenwelt erreicht wird, die beispielsweise auch Lokalität und Separabilität berücksichtigt, ist kein Nachteil der bohmschen Deutung allein. Vielmehr zeigt es, dass unsere klassischen Konzepte möglicherweise eine Beschränkung unseres menschlichen Horizontes in Bezug auf 'Verstehen' bedeuten. Geprägt durch klassische Eindrücke könnte es der Fall sein, dass wir außerhalb unseres Erfahrungsbereiches liegende Gebiete des Kosmos nie vergleichbar befriedigend verstehen können wie rein klassische Zusammenhänge - eben weil sich dann nicht alle eingangs als Bündelkriterien zusammengefassten Forderungen an eine Theorie erfüllen lassen.

Die vorliegende Arbeit bietet in ihrer Definition wissenschaftlichen Verstehens auch eine Antwort auf die Kritik an empirisch äquivalenten Theorien und ihrer negativen Implikation für den Sinn von Wissenschaft. Empirisch äquivalente Theorien müssen demnach kein Argument gegen den Sinn von Wissenschaft darstellen - vielmehr bedeutet ihre Auffindung und Untersuchung trotz empirischer Äquivalenz genau dann einen Fortschritt, wenn man die Theorien anschließend bezüglich ihrer Verstehbarkeit bewertet.

Das Auffinden von Theorien, die eine immer größere Anzahl von Bündelkriterien berücksichtigen, bedeutet dann eine kontinuierliche Verbesserung unseres wissenschaftlichen Verstehens - denn in dieser Hinsicht sind die Theorien, wie wir gesehen haben, nicht äquivalent, sondern unterscheid- und bewertbar. Der Suche nach weiteren Theorien in der Physik wäre somit nicht nur durch die mögliche empirische Überlegenheit neuer Theorien eine Rechtfertigung gegeben, sondern auch durch deren mögliche bessere Verstehbarkeit.

Literaturverzeichnis

- [1] *Albert, D. und Loewer, B.:* Interpreting the Many-Worlds Interpretation. *Synthese* 77 (1988), S. 195-213.
Albert, D. und Loewer, B.: Two Non-Collapse Interpretations of Quantum Mechanics. *Nous* 12 (1989), S. 121-138.
- [2] *Aronson, J.:* On the Grammar of Cause. *Synthese* 22 (1971), S. 417-418.
- [3] *Aspect, A., Dalibard, J. und Roger, G.:* Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time - Varying Analyzers. In: *Physical Review Letters* 49, Nr. 25 (1982), S. 1804-1807.
- [4] *Bacciagaluppi, G.:* Virtual Reality: Consequences of No-Go Theorems for the Modal Interpretation of Quantum Mechanics. In: *Language, Quantum, Music. Synthese Library* 281 (1995).
- [5] *Bartels, A.:* Grundprobleme der modernen Naturphilosophie, UTB Stuttgart 1996.
- [6] *Bell, J.:* On the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox. *Physics* (1964), 1: 195-200.
Bell, J.: Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics (Collected papers on quantum philosophy). Cambridge University Press, Cambridge 1987.
- [7] *Bohm, D.:* A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of 'Hidden' Variables. In: *Physical Review* 85, Nr. 2 (1952), S. 166-179.
Bohm, D. und Hiley, B.: The Undivided Universe: Ontological Interpretation of Quantum Theory. Routledge Chapman and Hall, New York 1993.
- [8] *Bohr, N.:* Atomic Structure. In: *Nature*. 106 (1921), S. 104-107.
Bohr, N.: Atomic Theory and the Description of Nature. Cambridge University Press, Cambridge 1934.

Literaturverzeichnis

- Bohr*, N.: Atomic Theory and the Description of Nature. *Nature* 133 (1934), S. 962-964.
- Bohr*, N.: Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete? In: *Physical Review*, 48 (1935), S. 700.
- Bohr*, N.: Natural Philosophy and Human Cultures. *Nature* 143 (1938).
- [9] *Born*, M.: Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge. In: *Zeitschrift für Physik* 37, Nr. 12 (1926), S. 863-867.
- Born*, M.: *The Born-Einstein Letters*. Trans. I. Born, Walker, New York 1971.
- [10] *Cabello*, A., *Estebaranz*, A., *Garca-Alcaine*, G.: Bell-Kochen-Specker theorem: A proof with 18 vectors. In: *Physics Letters A*, Volume 212, Issue 4 (1996), S. 183-187.
- [11] *Choi*, S.: Causation and gerrymandered world lines: A critique of Salmon. *Philosophy of Science*, 69 (2002), S. 105-117.
- [12] *Cramer*, J.: Generalized Absorber Theory and the Einstein-Podolski-Rosen Paradox. *Physical Review*, D 22 (1980), S. 362-376.
- Cramer*, J.: The Transactional Interpretation of Quantum Mechanics. *Review of Modern Physics*, 58 (1986), S. 647-687.
- [13] *De Broglie*, L.: La Mécanique ondulatoire et la structure atomique de la matière et du rayonnement. In: *Journal de Physique*, Serie VI. VIII, Nr. 5 (1927), S. 225-241.
- [14] *Dosch*, H. G.: *Quantum Field Theory in a Semiotic Perspective*. Schriften der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Klasse, Springer, Berlin 2005.
- [15] *Dowe*, P.: *Physical Causation*. Cambridge University Press, New York 2000.
- Dowe*, P.: Causing, Promoting, Preventing, Hindering. In *Ledwig, M., Spohn, W., Esfeld, M. (eds): Current Issues in Causation*. Mentis-Verlag, Paderborn 2000, S. 69-84.
- [16] *Duhem*, P., *Wiener*, P. (ed.): *The Aim and Structure of Physical Theory*. Princeton University Press, Princeton 1954.
- [17] *Einstein*, A., *Podolski*, B., *Rosen*, N.: Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Phys. Rev.* 47 (1935), S.

- 777-780.
- Einstein, A.*: Reply to Criticisms. In: *Schilpp, P.* (ed.): *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*. Tudor Publishing Co., London 1949.
- [18] *Everett, H.*: Relative State Formulation of Quantum Mechanics. In: *Rev. Mod. Phys.* 29 (1957), S. 454-462.
- [19] *Fair, D.*: Causation and the Flow of Energy. *Erkenntnis* 14 (1979), S. 219-250.
- [20] *Faye, J.*: Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics. Stanford Library of Philosophy, first published Fri May 3, 2002, substantive revision Thu Jan 24 (2008).
- [21] *Feynman, Richard*: *The Character of Physical Law*. Modern Library, New York 1965.
- [22] *Fine, A.*: *The Shaky Game*. The University of Chicago Press, Chicago 1986.
- [23] *Fleming, G.*: Towards a Lorentz Invariant Quantum Theory of Measurement. In: *Greenberger, D.* (ed.): *New Techniques and Ideas in Quantum Measurement Theory*. New York Academy of Sciences, No. 480 (1986), S. 574-575.
- [24] *Folse, H.*: Niels Bohr, Complementarity, and Realism. In: *Fine, A.* und *Machamer, P.* (eds.): *Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association, Vol. I*, East Lansing: PSA (1986), S. 96-104.
- [25] *Fraassen, van B.*: *The Scientific Image*. Oxford University Press, Oxford 1980.
- [26] *Friedman, M.*: Explanation and Scientific Understanding. *The Journal of Philosophy*, Vol. 71, No. 1 (1974), S. 5-19.
- [27] *Ghirardi, G., Rimini, A.* und *Weber, T.*: A Model for a Unified Quantum Description of Macroscopic and Microscopic Systems. In: *Accardi, L.* et al. (eds-): *Quantum Probability and Applications*. Springer, Berlin 1985.
- [28] *Goldstein, S.*: Bohmian Mechanics. Stanford Library of Philosophy, <http://plato.stanford.edu/entries/qm-bohm/>, first published Fri Oct 26 (2001); substantive revision Fri May 19 (2006).

Literaturverzeichnis

- [29] *Heisenberg, W.*: Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen. *Zeitschrift für Physik* 33 (1925), S. 879-893.
- [30] *Held, C.*: Die Bohr-Einstein-Debatte. Quantenmechanik und physikalische Wirklichkeit. Mentis-Verlag, Paderborn 1998.
- [31] *Hempel, C.*: The Function of General Laws in History. *Journal of Philosophy* 39 (1942), S. 35-48.
Hempel, C. und *Oppenheim, P.*: Studies in the Logic of Explanation. *Philosophy of Science* 15 (1948), S. 135-175.
Hempel, C.: Aspects of Scientific Explanation and Other Essays in the Philosophy of Science. Free Press, New York 1965.
- [32] *Hitchcock, C.*: Discussion: Salmon on Explanatory Relevance. *Philosophy of Science* 62 (1995), S.304-320.
- [33] *Holland, P.*: A Quantum Theory of Motion. Cambridge University Press, Cambridge 1995.
- [34] *Horwich, P.*: Asymmetries in Time: Problems in the Philosophy of Science. The MIT Press, Cambridge 1987.
- [35] *Howard, D.*: Holism, Separability and the Metaphysical Implications of the Bell Experiments. In: *Cushing, J.* und *McMullin, E.* (ed.): *Philosophical Consequences of Quantum Theory: Reflections on Bell's Theorem.* University of Notre Dame Press, Indiana 1989, S. 224-253.
- [36] *Huggett, N.* (ed.): *Space from Zeno to Einstein: Classic Readings with a Contemporary Commentary.* Bradford Book, The MIT Press, Cambridge 1999.
- [37] *Hume, D.*: *An Enquiry concerning Human Understanding.* England 1777. In: *Nidditch, P.* (ed.), 3rd. ed., Clarendon Press, Oxford 1975.
- [38] *Kitcher, P.*: Explanatory Unification and the Causal Structure of the World. In: *Kitcher, P.* und *Salmon, W.* (eds.): *Minnesota Studies in the Philosophy of Science, Volume XIII,* University of Minnesota Press, Minneapolis 1989, S. 410-505.
- [39] *Klärner, H.*: *Der Schluß auf die beste Erklärung.* Walter de Gruyter, Berlin/New York 2003.

- [40] *Kochen, S. und Specker, E.*: The Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics. *Journal of Mathematics and Mechanics* 17 (1967), S. 59-87.
- [41] *Lewis, D.*: Causation. *The Journal of Philosophy*, Vol. 70, No. 17 (1973), S. 556-567.
- [42] *Maudlin, T.*: Quantum Non-Locality and Relativity. Blackwell Publishing, Oxford 1994.
- [43] *Mehlbeg, S., Fawcett, C., Cohen, R.*: Time, Causality, and the Quantum Theory. *Studies in the Philosophy of Science*. Vol. 1, Auflage 1, Springer Nederland, Amsterdam 1980.
- [44] *Murdoch, D.*: Niels Bohr's Philosophy of Physics. Cambridge University Press, Cambridge 1987.
- [45] *Nerlich, G.*: What Can Geometry Explain? *British Journal for the Philosophy of Science* 30 (1979), S. 69-83.
- [46] *Neumann, von J.*: Mathematical Foundations of Quantum Mechanics. Princeton University Press, Princeton 1932.
- [47] *Newton, I.*: Die mathematischen Prinzipien der Physik: *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. England 1686. In: *Schller, V.* (ed.): Die mathematischen Prinzipien der Physik. Walter de Gruyter Verlag, Berlin 1999.
Newton, I., Turnbull, W. (ed.): The Correspondence of Isaac Newton: Volume 3. Cambridge University Press, Cambridge 1960, S.: 1688-1694.
- [48] *Passon, O.*: Bohmsche Mechanik. Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main 2004.
- [49] *Pauli, W.*: Über das Wasserstoffspektrum vom Standpunkt der neuen Quantenmechanik. *Zeitschrift für Physik* 36 (1926), S. 336-363.
- [50] *Putnam, H.*: A Philosopher Looks at Quantum Mechanics. In: *Colodny, R.* (ed.): *Beyond the Edge of Certainty: Essays in Contemporary Science and Philosophy*, Englewood Cliffs. N.J.: Prentice-Hall, Cambridge 1965, S. 75-101; Wiederabdruck in *Putnam, H.*: *Mathematics, Matter and Method*, Cambridge, Mass. Cambridge University Press, Cambridge 1975, S. 130-158.

Literaturverzeichnis

- [51] *Railton, P.*: A Deductive-Nomological Model of Probabilistic Explanation. *Philosophy of Science* 45 (1978), S. 206-226.
- [52] *Reichenbach, H.*: Der Aufstieg der wissenschaftlichen Philosophie. In: *Kamlah, A. und Reichenbach, M.*: Gesammelte Werke in 9 Bänden, Vieweg, Wiesbaden 1977.
- [53] *Regt, de H.*: Ludwig Boltzmann's Bildtheorie and Scientific Understanding. *Synthese*, Volume 119, Numbers 1-2 (1999).
- [54] *Salmon, W.* (ed.): *Statistical Explanation*. In: *Statistical Explanation and Statistical Relevance*. University of Pittsburgh Press, S. 29-87, Pittsburgh 1971.
- Salmon, W.* (ed.): *Statistical Explanation and Statistical Relevance*. University of Pittsburgh Press, Pittsburgh 1971.
- Salmon, W.*: *Scientific Explanation and the Causal Structure of the World*. Princeton University Press, Princeton 1984.
- Salmon, W.*: *Four Decades of Scientific Explanation*. University of Minnesota Press, Minneapolis 1989.
- Salmon, W. und Kitcher, P.* (eds.): *Minnesota Studies in the Philosophy of Science*, Vol 13, *Scientific Explanation*, University of Minnesota Press, Minneapolis 1989.
- Salmon, W.*: *Causality Without Counterfactuals*. In: *Philosophy of Science*, 61 (1994), S. 297-312.
- Salmon, W.*: *Causality and Explanation: A Reply to Two Critiques*. *Philosophy of Science*, 64 (1997), S. 461-477.
- [55] *Schrödinger, E.*: Quantisierung als Eigenwertproblem I. *Annalen der Physik* 79 (1926), S. 361-376.
- Schrödinger, E.*: Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik. *Naturwissenschaften*, 23 (1935), S. 807-812, 823-828, 844-849.
- [56] *Scriven, M.*: Truisms as the Grounds for Historical Explanation. In: *Gardiner, P.* (ed.), *Theories of History*, The Free Press, New York 1959, S. 456.
- [57] *Skyrms, B.*: *Causal Necessity*. Yale University Press, New Haven 1980.
- [58] *Sklar, L.* (ed.): *Explanation, Law and Cause*. Garland Publishing Inc.,

New York and London 2000.

- [59] *Teller, P.*: Relational Holism and Quantum Mechanics. *British Journal for the Philosophy of Science* 37 (1986), S. 71-81.
- [60] *Valentini, A.*: Universal Signature of Non-Quantum Systems, [quant-ph/0309107](http://arxiv.org/abs/quant-ph/0309107) (2003).
- [61] *Wetterich, C.*: Spontaneous symmetry breaking origin for the difference between time and space. *Physical Review Letters* 94: 011602 (2005).
- [62] *Wigner, E. P.*: Remarks on the Mind-Body Question. In: I. J. Good (ed.): *The Scientist Speculates: An Anthology of Partly-baked Ideas*. *American Journal of Physics*, Vol. 32, Issue 4 (1964), S. 284-302.
- [63] *Woodward, J.*: *Making Things Happen: A Theory of Causal Explanation*. Oxford University Press, Oxford 2003.
Woodward, J.: Scientific Explanation. <http://plato.stanford.edu/entries/scientific-explanation/> , first published Fri May 9 (2003); substantive revision Fri Jan 16 (2009).
- [64] *Yourgrau, P.*: *Gödel, Einstein und die Folgen. Vermächtnis einer ungewöhnlichen Freundschaft*. Beck, München 2005.
- [65] *Zurek, W.*: Decoherence of quantum fields: Pointer states and predictability. *Physical Review D* 53 (1996), S. 7327-7335.
Zurek, W.: Decoherence, chaos, quantum classical correspondence, and the algorithmic arrow of time. *Physics Scripta* T76 (1998), S. 186-198.

Danksagung

Ich möchte mich ganz besonders bei Prof. Dr. Andreas Bartels für die hervorragende Betreuung und die ausgezeichnete Zusammenarbeit an einem sehr spannenden Thema bedanken. Ich habe davon sehr profitiert.

Prof. Dr. Elke Brendel, Prof. Dr. Dieter Sturma und Prof. Dr. Hans-Joachim Pieper danke ich für gute Gespräche und ihre Zustimmung, meine Prüfungskommission zu bilden. Prof. Dr. Christof Wetterich danke ich für sein Interesse an meiner Arbeit und seine Unterstützung meiner Entscheidung, in Philosophie zu promovieren. Prof. Dr. Hans Günther Dosch danke ich für gute Ideen, gerade in der Startphase. Ich danke Prof. Dr. Dieter Lüst sehr dafür, dass er bereit ist, im Falle einer Veröffentlichung über einen Verlag ein Vorwort für meine Arbeit zu schreiben. Außerdem danke ich Privatdozent Dr. Cord Friebe für strenge und unerbittliche Diskussionen, die stets lehrreich waren.

Daneben danke ich Dr. Alexej Weber für stundenlange kritische Diskussionen und seine wertvollen Ideen und Anmerkungen. Danke auch für das detaillierte Korrekturlesen, die Beschaffung von Literatur, Bild- und Tonmaterial zur gemeinsamen philosophischen Fortbildung und die vielen Ermutigungen.

Ich danke Timm Krüger für das Korrekturlesen meines Eingangskapitels und meinen lieben Freundinnen Dr. Kristin Riebe für wertvolle Latex-Tipps und telefonischen Beistand und Katharina Neumeyer für ihre ehrliche Begeisterung für meine Ideen und für ihre warmherzige Unterstützung. Meinen lieben Eltern danke ich für die hundertprozentige Unterstützung zu aller Zeit. Außerdem danke ich folgenden Mitgliedern der Familie Spillner auch ganz besonders: Meiner Schwester Evi, sowie Sebastian, Hubertus, Agathe-Augste, Frida und Fridolin.

Und nicht zuletzt danke ich der Studienstiftung des deutschen Volkes, dass sie mein Promotionsprojekt gefördert und meine Berichte stets wohlwollend und interessiert kommentiert hat.

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die von mir vorgelegte Dissertation selbstständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt, die benutzten Quellen und Hilfsmittel vollständig angegeben und die Stellen der Arbeit, die anderen Ursprungs sind, in jedem Einzelfall mit Angabe des Urhebers als solche kenntlich gemacht habe.

Desweiteren versichere ich, dass diese Dissertation noch keiner anderen Fakultät oder Universität zur Prüfung vorgelegen hat; dass sie noch nicht veröffentlicht ist sowie dass ich mich noch nicht anderweitig um einen Doktorgrad beworben habe bzw. einen solchen bereits besitze.

Die dem Verfahren zugrunde liegende Promotionsordnung der Universität Bonn ist mir bekannt.

Die von mir vorgelegte Dissertation wurde von Prof. Dr. Andreas Bartels betreut.

Die Promotion wurde mit Fördermitteln der Studienstiftung des deutschen Volkes durchgeführt.