

LEHRBUCH

Cord Friebe · Meinard Kuhlmann
Holger Lyre · Paul Näger
Oliver Passon · Manfred Stöckler

Philosophie der Quantenphysik

Einführung und Diskussion
der zentralen Begriffe und
Problemstellungen der Quantentheorie
für Physiker und Philosophen



Springer Spektrum

Cord Friebe
Institut für Philosophie
Rheinische Friedrich-Wilhelms-
Universität Bonn
Bonn, Deutschland

Meinard Kuhlmann
Abteilung Philosophie
Universität Bielefeld
Bielefeld, Deutschland

Holger Lyre
Institut für Philosophie
Universität Magdeburg
Magdeburg, Deutschland

Paul Näger
Philosophisches Seminar
Westfälische Wilhelms-Universität
Münster, Deutschland

Oliver Passon
Fachbereich Physik
Bergische Universität Wuppertal
Wuppertal, Deutschland

Manfred Stöckler
Institut für Philosophie
Universität Bremen
Bremen, Deutschland

ISBN 978-3-642-37789-1
DOI 10.1007/978-3-642-37790-7

ISBN 978-3-642-37790-7 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Spektrum

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Planung und Lektorat: Dr. Vera Spillner, Stefanie Adam

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Spektrum ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.
www.springer-spektrum.de

Vorwort

Die *Philosophie der Quantenphysik* geht auf eine Initiative des Springer-Spektrum Verlages zurück, wofür unser besonderer Dank Frau Dr. Vera Spillner gilt. Die Koordinierung der Zusammenarbeit zwischen den Autoren und mit dem Verlag besorgte Cord Friebe – die anderen Autoren danken ihm für diese mühevollen Arbeit ganz herzlich!

Leitidee war es, eine Lücke auf dem deutschsprachigen Lehrbuchmarkt zu schließen, die zwischen allgemeinen Einführungen in diesen Themenkreis und spezialisierten Monografien besteht. Gerade die Vielzahl populärer Darstellungen dokumentiert das große Interesse auch einer breiten Leserschaft an den erkenntnistheoretischen und ontologischen Implikationen der Quantentheorie. Unser Ziel war es nun, fortgeschrittenen Philosophiestudenten mit einem Interesse für Physik eine aktuelle und solide Einführung in die Philosophie der Quantentheorie zu geben. Zugleich konfrontiert das Buch auch Physikerinnen und Physiker mit den philosophischen Fragen ihres Faches. Ebenso können dem Band Anregungen für die Lehramtsausbildung in den Fächern Philosophie und Physik entnommen werden.

Dass zwischen diesen Disziplinen ein enger Zusammenhang besteht, bedarf kaum einer besonderen Begründung, und dieses Verhältnis erfährt in Phasen des wissenschaftlichen Umbruchs stets eine Intensivierung. Neue physikalische Theorien können das bisherige philosophische Wirklichkeitsverständnis herausfordern oder sogar revidieren. Gleichzeitig kann die Philosophie einen Beitrag zum genaueren Verständnis und zur Interpretation naturwissenschaftlicher Ergebnisse leisten. Die Umwälzungen in der Physik des frühen 20. Jahrhunderts durch die Entwicklung von Quantenmechanik und Relativitätstheorie belegen das nachdrücklich.

In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts setzte eine Entwicklung ein, in deren Verlauf die Philosophie der Physik zu einem sehr lebendigen und hoch professionalisierten Zweig der angelsächsisch geprägten Wissenschaftsphilosophie wurde. Zwar spielen Anregungen durch Physiker weiter eine Rolle, aber die Hauptströmung der Forschung wird von Philosophinnen und Philosophen getragen, die in der Physik einen guten fachwissenschaftlichen Hintergrund haben, in ihrer Arbeit sich aber ganz auf Grundlagenfragen und philosophische Probleme der jeweiligen physikalischen Theorien konzentrieren. Die Ergebnisse dieser Forschungen werden in spezialisierten Zeitschriften publiziert und diskutiert. Diese Professionalisierung hat auch dazu geführt, dass die neueren Debatten und Ergebnisse dieser Auseinandersetzung in Physikerkreisen wenig bekannt sind. Dieses Buch will deshalb an den maßgebenden gegenwärtigen Diskussionsstand heranführen.

Die Fachdiskussion in den Zeitschriften setzt meistens detaillierte mathematische, physikalische und philosophische Kenntnisse voraus. Unsere Darstellung möchte auch hier eine Brückenfunktion übernehmen und setzt im Wesentlichen nur Schulkenntnisse voraus. Alle weiteren (auch mathematischen) Hilfsmittel und

Begriffe werden grundständig eingeführt; je nach Stand der Vorkenntnisse setzt dies jedoch ein aktives Durcharbeiten vor allem der ersten beiden Kapitel voraus.

Charakteristisch für die Quantenphysik ist, dass auch ein Jahrhundert nach ihrer Entwicklung ihre Folgen für unser Wirklichkeitsverständnis noch kontrovers diskutiert werden. Während diese Theorie in beeindruckendem Maße die Beschreibung und Berechnung von Phänomenen erlaubt, ist ihre Beziehung zu den „Dingen“ und „Eigenschaften“ der Welt weiterhin unklar bzw. konkurrieren zahlreiche Ansätze um die Aufklärung dieses zentralen Zusammenhangs. Dieses Buch bietet eine Einführung in die zahlreichen philosophischen Herausforderungen der Quantentheorie. Dabei werden Debatten nachgezeichnet und in den Kontext der aktuellen Forschungsergebnisse eingeordnet. Grundsätzlich folgt das Buch jedoch einer systematischen Darstellung.

Die folgende Übersicht über die Kapitel soll dem Leser die Orientierung erleichtern und die Beziehungen zwischen den Teilen verdeutlichen. Das erste Kapitel wählt, im Sinne der Gesamtkonzeption des Buches, einen systematischen Einstieg in die zentralen Grundkonzepte der Quantentheorie, darunter insbesondere den Begriff der „Superposition“, und stellt sukzessive den mathematischen Apparat bereit. Auf die Verwendung von Differenzialrechnung und Differenzialgleichungen wird weitgehend verzichtet. Vorausgesetzt sind lediglich einfache Grundlagen der Koordinatengeometrie, Vektor- und Matrizenrechnung.

Nach Klärung der Grundlagen führt das zweite Kapitel in die Minimalinterpretation und die von vielen Physikern immer noch als Standardinterpretation angesehene „Kopenhagener Deutung“ ein. Die Kopenhagener Deutung wurde jedoch weder je streng kodifiziert, noch ist sie ohne Probleme. So sind insbesondere die Behandlung des Messprozesses und die Rolle des Beobachters innerhalb dieser Deutung umstritten. Ghirardi, Rimini und Weber haben deshalb 1986 eine Modifikation der Theorie vorgeschlagen. Diese – nach den Anfangsbuchstaben der Autorennamen GRW genannte Theorie – beschreibt einen „spontanen Kollaps“ und wird am Ende des zweiten Kapitels vorgestellt.

Während die ersten beiden Kapitel lediglich 1-Teilchen-Zustände betrachten, werden im dritten Kapitel Mehrteilchen-Systeme eingeführt und ihre Besonderheiten diskutiert. Dabei spielt das ebenso erstaunliche wie für die Quantentheorie charakteristische Faktum der empirischen Ununterscheidbarkeit gleichartiger Quantenobjekte eine entscheidende Rolle. Es findet seinen Niederschlag vor allem in der Quantenstatistik, die eine bedeutsame Revision der klassischen statistischen Mechanik darstellt. Die empirische Ununterscheidbarkeit von Quantenobjekten wirft tiefliegende ontologische Fragen nach „Identität“ und „Individualität“ auf, die sich vor allem in der in jüngerer Zeit wieder neu belebten Debatte um die Anwendbarkeit des Leibniz-Prinzips in der Quantentheorie manifestieren.

Das vierte Kapitel beschäftigt sich mit dem Themenkreis „Verschränkte Zustände“ und „Nicht-Lokalität“. Da Verschränkung eine Relation zwischen zwei (oder mehr) Quantensystemen ist, knüpft das Kapitel inhaltlich an die Konzepte an,

die im dritten Kapitel eingeführt wurden. Die Besonderheit dieser Systeme besteht darin, dass sie sich zu beeinflussen scheinen, auch wenn sie räumlich beliebig weit voneinander entfernt sind. Diese Nicht-Lokalität der Quantentheorie ist vor allem deshalb problematisch, weil sich solche Einflüsse schneller als Licht ausbreiten müssten, was nach üblichem Verständnis der speziellen Relativitätstheorie widerspricht. Die Diskussion um die Nicht-Lokalität erlebte einen frühen Höhepunkt in einer Arbeit von Einstein, Podolsky und Rosen aus dem Jahre 1935. Eigentlich wollten EPR mit ihrem Gedankenexperiment die Unvollständigkeit der Quantentheorie begründen. John Bell konnte Anfang der 60er Jahre aber mit Hilfe einer Erweiterung des EPR-Arguments beweisen, dass diese Nicht-Lokalität der Quantentheorie auch durch eine „Vervollständigung“ (durch „verborgene Variablen“) nicht behoben werden kann. Bell konnte zeigen, dass lokale Theorien die starken Korrelationen, die mittlerweile auch experimentell bestätigt sind, nicht reproduzieren können. Aus Bells Argument sind weitreichende Konsequenzen gezogen worden, und das vierte Kapitel beinhaltet eine ausführliche Diskussion dieser Zusammenhänge und ihrer Begründungen. Mithilfe kausaler Graphen soll die abstrakte Diskussion um Bells Theorem anschaulicher zugänglich gemacht werden.

Das Stichwort „verborgene Variablen“ wurde bereits angesprochen, und im ersten Teil des fünften Kapitels wird mit der De-Broglie-Bohm-Theorie der bekannteste Vertreter dieser Interpretationsgattung vorgestellt. Hier werden einige der radikalen erkenntnistheoretischen und ontologischen Implikationen beispielsweise der Kopenhagener Deutung vermieden: Quantenobjekte bewegen sich gemäß dieser Deutung tatsächlich auf Bahnen, und in einem formalen Sinne ist diese Theorie sogar deterministisch. Der Preis, der dafür gezahlt werden muss, liegt in Eigenschaften, deren Annehmbarkeit kontrovers diskutiert wird. Ähnlich verhält es sich mit der Viele-Welten-Interpretation der Quantentheorie, die im zweiten Teil des fünften Kapitels vorgestellt wird. Ihre Lösung des Messproblems ist ebenso elegant, wie ihre metaphysischen Implikationen extravagant sind. Beide Interpretationen haben die Gemeinsamkeit, auf den „Kollaps“ der Wellenfunktion zu verzichten, daher ihre gemeinsame Vorstellung in einem Kapitel.

Im sechsten Kapitel wird der Bogen zu (relativistischen) Quantenfeldtheorien geschlagen. Teilchenzahlen werden nun variabel (man spricht etwa von „Erzeugung“ und „Vernichtung“ von Teilchen). Quantenfeldtheorien erlauben es, auch die Wechselwirkung von Strahlung und Materie im Rahmen der Quantentheorie zu erfassen. So können alte Probleme wie der Dualismus von Welle und Teilchen und die Nicht-Lokalität der Mikrowelt mit neuen mathematischen Mitteln diskutiert werden. Allerdings wird hier noch einmal besonders deutlich, was in allen Kapiteln für Schwierigkeiten gesorgt hat: Die Frage, wie der mathematische Formalismus der Theorie mit der realen Welt in Zusammenhang gebracht werden kann, ist nicht mehr einfach beantwortbar, wenn man über die Zuweisung von möglichen Messwerten für konkrete Messungen hinausgeht, wenn man also mit einer Minimalinterpretation der Quantentheorie nicht zufrieden ist.

Schließlich rundet das siebte Kapitel das Buch im Rahmen einer kleinen Chronologie wichtiger Entwicklungsschritte in physikalisch-mathematischer wie auch interpretatorischer Hinsicht ab. Der im wesentlichen systematische Aufbau des Buches wird hier durch historische Angaben ergänzt, und die kurzen Erläuterungen zu Meilensteinen der Entwicklung können auch wie ein Glossar gelesen werden. Zudem kommen hier Interpretationsansätze zur Sprache, die im Rahmen des Buches nicht eingehender behandelt werden konnten.

Die vielen intensiven Diskussionen im Kreis der Autoren haben gezeigt, dass jeder der sechs Autoren zum gleichen Thema ein anderes Buch geschrieben hätte. Wir hoffen, dass unsere Kooperation zur besten aller möglichen Versionen geführt hat.

Cord Friebe, Meinard Kuhlmann, Holger Lyre, Paul Näger, Oliver Passon und Manfred Stöckler

Juli 2014

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	v
1 Physikalisch-mathematische Grundlagen	1
<i>Cord Friebe</i>	
1.1 Spin und Superposition	4
1.1.1 Stern-Gerlach-Experiment	5
1.1.2 Aufeinanderfolgende Spinnmessungen	7
1.1.3 Superpositionsprinzip	11
1.2 Mathematischer Formalismus der Quantenmechanik	16
1.2.1 Vektoren und ihre Darstellung	17
1.2.2 Operatoren und ihre Eigenwerte	20
1.2.3 Das Problem mehrfacher Eigenwerte	29
1.2.4 Spezielle Operatoren und Ortsdarstellung	33
Literatur zu Kapitel 1	41
2 Messproblem, Minimal- und Kollapsinterpretationen	43
<i>Cord Friebe</i>	
2.1 Minimalinterpretation	45
2.2 Ensemble-Interpretation und Kopenhagener Deutung	49
2.2.1 Ensemble-Interpretation	52
2.2.2 Kopenhagener Deutung(en)	54
2.3 Messproblem und Dekohärenz	60
2.3.1 Quantenmechanisches Messproblem	62
2.3.2 Dekohärenzprogramm	67
2.4 Realistische Kollaps-Deutung: GRW	70
2.4.1 Nicht-lineare Dynamik	70
2.4.2 GRW-Ontologien und ihre Kritik	74
Literatur zu Kapitel 2	77
3 Quanten-Identität und Ununterscheidbarkeit	79
<i>Holger Lyre</i>	
3.1 Quantentheorie gleichartiger Objekte	79
3.1.1 Statistische Mechanik	79
3.1.2 Mehr-Teilchen-Tensorprodukt	81
3.1.3 Quantenstatistik	83
3.1.4 Symmetrische Gruppe	86
3.2 Ontologie der Quantentheorie	89
3.2.1 Identität und Leibniz-Prinzip	89
3.2.2 Leibniz-Prinzip und Quantentheorie	97
3.2.3 Schwache Unterscheidbarkeit	103
3.2.4 Ausblick	106
Literatur zu Kapitel 3	109

4	Verschränkung und Nicht-Lokalität: EPR, Bell und die Folgen	113
	<i>Paul Näger und Manfred Stöckler</i>	
4.1	Einführung und Überblick	113
4.2	Das EPR-Argument und seine Folgen	115
4.3	Der Bellsche Beweis	124
	4.3.1 Experimentelle Grundlagen	125
	4.3.2 Das ursprüngliche Bell-Theorem	131
	4.3.3 Bells Theorem als Strategie-Spiel	133
	4.3.4 Bells Theorem präzise	138
4.4	Nicht-Lokalität	143
	4.4.1 Lokalität vs. Hintergrundannahmen	143
	4.4.2 Konfliktfelder mit der Relativitätstheorie	145
	4.4.3 Signale und Kausalität	148
	4.4.4 Outcome Dependence vs. Parameter Dependence	149
	4.4.5 Nicht-Separabilität	152
	4.4.6 Holismus	157
	4.4.7 Nicht-Lokalität und Relativitätsprinzip	159
4.5	Alternative Lösungsvorschläge	163
	4.5.1 Kausale Markov-Bedingung	163
	4.5.2 Interventionsannahme	166
	4.5.3 Rückwärtsverursachung	168
	4.5.4 Fazit zu den alternativen Lösungsvorschlägen	171
4.6	Resümee	171
	Literatur zu Kapitel 4	172
5	Nicht-Kollaps-Interpretationen	177
	der Quantentheorie	
5.1	Die De-Broglie-Bohm-Theorie	178
	5.1.1 Mathematische Beschreibung	179
	5.1.2 Die Quantengleichgewichtshypothese	183
	5.1.3 Die Führungsgleichung	185
	5.1.4 Anwendungen der De-Broglie-Bohm-Theorie	186
	5.1.5 Die Lösung des Messproblems	190
	5.1.6 Die Schulen der De-Broglie-Bohm-Theorie	194
	5.1.7 Kritik an der De-Broglie-Bohm-Theorie	196
5.2	Die Everett-Interpretation	199
	5.2.1 Die Grundidee	200
	5.2.2 Die Viele-Welten-Interpretation	201
	5.2.3 Das Problem der bevorzugten Basis	203
	5.2.4 Die Rolle der Dekohärenztheorie	206
	5.2.5 Wahrscheinlichkeit in der Everett-Interpretation	209
	5.2.6 Kritik an der Everett-Interpretation	215
5.3	Zusammenhang zwischen den verschiedenen Interpretationen	219

Literatur zu Kapitel 5	221
6 Quantenfeldtheorie	225
<i>Meinard Kuhlmann und Manfred Stöckler</i>	
6.1 Charakterisierung der Quantenfeldtheorie	225
6.2 Raumzeitliche Beschreibung von Prozessen	227
6.3 Mathematische Struktur	229
6.3.1 Quantisierung von Feldern	230
6.3.2 Das einfachste Beispiel einer Quantenfeldtheorie	233
6.3.3 Besetzungszahldarstellung	239
6.3.4 Quantenfeldtheorie und Experiment	244
6.3.5 Probleme der konventionellen Quantenfeldtheorie	249
6.4 Interpretationen der Quantenfeldtheorie	254
6.4.1 Vorbemerkungen	254
6.4.2 Teilcheninterpretation	255
6.4.3 Feldinterpretation	263
6.5 Neue Wege der Interpretation	265
6.5.1 Ontischer Strukturenrealismus	265
6.5.2 Eine tropenontologische Interpretation	267
6.5.3 Fazit zur Ontologie der Quantenfeldtheorie	270
Literatur zu Kapitel 6	270
7 Chronologie und Ausblick	275
<i>Cord Friebe, Meinard Kuhlmann und Holger Lyre</i>	
7.1 Frühphase der Quantenphysik	276
7.2 Etablierung der Standard-Quantenmechanik	277
7.3 Bestätigung und neue Herausforderungen	279
Register	289

1 Physikalisch-mathematische Grundlagen

Cord Friebe

Übersicht

1.1 Spin und Superposition	4
1.2 Mathematischer Formalismus der Quantenmechanik	16
Literatur zu Kapitel 1	41

Gegenstand dieses ersten Kapitels zur Philosophie der Quantenphysik¹ sind physikalische Systeme, von deren innerer Struktur abgesehen werden kann. Wir betrachten also zunächst Einzelsysteme, einzelne Silberatome etwa oder auch einzelne Elektronen, die nach heutigem Wissensstand tatsächlich keine innere Struktur besitzen. Damit lassen wir all jene Probleme zunächst beiseite, die Mehrteilchen- oder zusammengesetzte Systeme dem philosophischen Verständnis bereiten: den „Individualitätsverlust“ gleichartiger Teilchen ebenso wie das neuartige Verhältnis zwischen einem Ganzen und seinen Teilen, wie es das berühmte EPR-Paradoxon zeigt. Beiden Herausforderungen ist je ein eigenes Kapitel gewidmet.

Schon ein Einzelsystem aber, das Gegenstand der Quantenmechanik ist, wirft erhebliche philosophische Interpretationsprobleme auf. Dies zu sagen, bedeutet wohlgerne nicht, dass makroskopische Objekte der Alltagswelt oder der klassischen Physik keine Gegenstände philosophischer Kontroversen wären. Ganz im Gegenteil: Die Theoretische Philosophie (Erkenntnistheorie, Ontologie) nahm bei Platon und Aristoteles ihren Ausgang gerade bei der Betrachtung gewöhnlicher, sinnlich wahrnehmbarer Einzelgegenstände. So bezeichnen wir numerisch verschiedene Personen etwa gleichermaßen als „tapfer“, wie es bei Sokrates schon in einem

¹Die Quantenphysik umfasst wie die klassische Physik mehr als nur Mechanik, insbesondere auch Quantenfeldtheorie. Insofern diese ausdrücklich mitgemeint ist, wird von „Quantenphysik“ gesprochen, in der Regel aber beschäftigt sich dieses Grundlagenkapitel mit der Quantenmechanik.

Frühdialog Platons heißt. Daher stelle sich die Frage, was sie denn gemeinsam haben. Die *Tapferkeit* vielleicht, also eine Universalie, die irgendwie Mehrerem zukommen kann? Nämlich entweder als eine Idee *ante rem* in Platons Himmel, an der die konkreten, individuellen Personen ‚teilhaben‘, oder aber als etwas *in re*, das zu einem und demselben Zeitpunkt sowohl in dieser als auch in jener Person ‚instantiiert‘ ist. Das hiermit erstmals aufgeworfene Problem des Verhältnisses eines Objekts oder einer Person zu seinen/ihren Eigenschaften ist bis heute Gegenstand philosophischer Debatten – ganz unabhängig von den Entwicklungen in der modernen Physik.

Oder nehmen wir als zweites Beispiel den neuzeitlichen britischen Philosophen David Hume und sein skeptisches Argument gegen bestimmte Auffassungen der Kausalität: Wenn wir meinen, dass ein Ereignis wie etwa die Bewegung einer Billardkugel durch den Stoß einer anderen bewegten Billardkugel verursacht oder hervorgerufen werde, so glauben wir offenbar, dass die stoßende Billardkugel die gestoßene zu ihrer Bewegung *zwingt*, dass eine Art Kraft dafür Sorge, dass das Ereignis der Wirkung nicht ausbleiben kann, sondern stattfinden muss. Was wir aber tatsächlich beobachten, so Hume, sei lediglich ein zeitliches Nacheinander und ein räumliches Nebeneinander von zwei Bewegungen; eine bloß faktische Regularität und keinen Zwang, keine Notwendigkeit. Sind Verursachungsverhältnisse somit gar nichts anderes als raumzeitliche Regularitäten, oder gibt es über das Beobachtbare hinaus notwendige Vernüpfungen zwischen Ereignissen in der Welt? Auch diese Kontroverse dauert bis heute an – ganz unabhängig von quantenphysikalischen Phänomenen.

Worauf es in diesem ersten Kapitel vor allem ankommt, ist daher dieses: Herauszustellen, dass ein quantenmechanisches Einzelsystem jedem theoretischen Philosophen *zusätzliche* Schwierigkeiten bereitet. Gleichgültig, ob jemand ein (moderner) Aristoteliker, Humeaner oder auch Kantianer ist: Es gibt empirische Phänomene im Bereich des Mikroskopischen und theoretische Konsequenzen der Quantenmechanik, die unabhängig von der philosophischen Grundeinstellung eine besondere Herausforderung darstellen – und zwar schon beim Einzelsystem. Die Diskussion dieser Phänomene und Konsequenzen kann dann grundsätzlich auf zwei verschiedene Weisen philosophisch fruchtbar sein: entweder als Befruchtung andauernder philosophischer Kontroversen, indem die Quantenmechanik zur Stützung einer vorhandenen Position ins Feld geführt wird, oder aber in dem Sinne, dass sie zur Entwicklung gänzlich neuartiger philosophischer Theorien zwingt.

Auf diese Weise einzusteigen, könnte man aber als tendenziös empfinden: Denn danach erscheint die Quantenmechanik einseitig als ein Problem für die Philosophie, nämlich insofern anscheinend nur die Frage gestellt ist, welche die zur Quantenmechanik passende philosophische Theorie sein möge. Physikerinnen und Physiker, aber auch viele Physik-Philosophinnen und Physik-Philosophen, sehen das vielleicht ganz anders: Wenn etwa der Physiker Niels Bohr den Begriff der „Komplementarität“ zur Deutung der Quantenmechanik ins Spiel brachte, so ha-

2 Messproblem, Minimal- und Kollapsinterpretationen

Cord Friebe

Übersicht

2.1 Minimalinterpretation	45
2.2 Ensemble-Interpretation und Kopenhagener Deutung	49
2.3 Messproblem und Dekohärenz	60
2.4 Realistische Kollaps-Deutung: GRW	70
Literatur zu Kapitel 2	77

Nicht erst in der Philosophie, sondern bereits in der Physik wird *interpretiert*. Mathematische Formalismen wie jener, der im vorhergehenden Kapitel in seinen Grundzügen präsentiert wurde, sind als solche selbst bloß abstrakt, sagen also für sich betrachtet noch nichts über die konkrete Wirklichkeit aus. Es bedarf einer Interpretation, zunächst in dem Sinne, dass den mathematischen Symbolen und Operationen Elemente in der Realität zugeordnet werden. Während aber in der klassischen Physik – in der Newtonschen Mechanik ebenso wie in der Maxwell'schen Elektrodynamik – eine solche Interpretation im Grunde auf der Hand lag, tauchen im Fall der Quantenmechanik von Beginn an erhebliche Schwierigkeiten auf: Der Hilbertraum ist im Gegensatz etwa zum sogenannten Phasenraum der klassischen Mechanik ein so abstrakter Vektorraum, dass dessen Vektoren und Operatoren nicht automatisch etwas in der Welt zugeordnet werden kann. Es gibt in der Quantenmechanik einen größeren Interpretationsspielraum als in der klassischen Physik: ein Spektrum, das weit reicht; von solchen Deutungen, die sich sehr nah am üblichen, von Neumann'schen Formalismus halten, bis zu Interpretationen, deren Eingriffe in den mathematischen Apparat durchaus gravierend sind.

Geht man systematisch vor, so sollte man mit einer Interpretation beginnen, auf die sich noch alle einigen könnten: mit einer instrumentalistischen *Minimalinterpretation*. Ihr zufolge repräsentieren hermitesche Operatoren makroskopische Messvorrichtungen, deren Eigenwerte die zu erzielenden Messwerte (Zeigerstellungen) und Skalarprodukte die Messwahrscheinlichkeiten. So formuliert, bleibt sie

in ihrem Realitätsbezug beim Makroskopischen stehen und enthält sich jeglicher ontologischen Aussage über das quantenphysikalische System selbst. Einen Schritt darüber hinaus geht die *Ensemble-Interpretation*: Danach beziehen sich die mathematischen Symbole zwar auf Mikroskopisches, aber bloß auf eine große Anzahl solcher Systeme. Die Quantenmechanik ist ihr zufolge eine Art statistische Theorie, deren Gesetz das der großen Zahl ist. Bezüglich des einzelnen Systems bleibt diese Deutung agnostisch. Nicht so ‚Kopenhagen‘: Mit den Physikern Niels Bohr und Werner Heisenberg begann der Formalismus erstmals über das individuelle Quantensystem zu sprechen. Damit aber war ein großes Problem aufgeworfen, weil sich nun die Frage stellte, was denn mit einem solchen System bei einer Messung geschehe. Während Bohr diesbezüglich noch zurückhaltend blieb, sich auf Details des Messvorgangs lieber nicht einließ, betonte Heisenberg die Einbettung des Messgerätes in eine Umgebung, zu welcher der messende Beobachter wesentlich hinzugehöre. An dieser Stelle kommt der berühmte *Kollaps* der Wellenfunktion ins Spiel, der aber gemäß Kopenhagener Deutung entweder bloß methodologisch oder explizit epistemisch, jedenfalls nicht ontologisch zu verstehen ist. Letztlich bleibt die Kopenhagener Deutung also an entscheidender Stelle agnostisch oder gar anti-realistisch. Inzwischen werden daher, insbesondere in der Quantenphilosophie, einige *realistische* Kollaps-Deutungen sehr ernst genommen, so beispielsweise die 1986 von den Physikern GianCarlo Ghirardi, Alberto Rimini und Tullio Weber entwickelte. Diese *GRW-Theorie* ist auch eine erste hier vorgestellte Interpretation, die in den mathematischen Apparat eingreift, indem sie die lineare Schrödinger-Gleichung durch eine nicht-lineare zeitliche Dynamik ersetzt.¹

Schritt für Schritt werden wir also ‚realistischer‘, nämlich in dem Sinne, dass immer mehr mathematischen Symbolen und Operationen reale Vorgänge in der Welt zugeordnet werden. Die *philosophische* Interpretation geht meistens noch weiter, indem sie etwa fragt, ob angesichts des sogenannten Individualitätsverlusts gleichartiger Quantensysteme der philosophische Substanzbegriff obsolet wird, ob quantenphysikalische Systeme überhaupt persistieren, also eine zeitüberdauernde Identität haben, und wie denn das Verhältnis eines Ganzen zu seinen Teilen im Lichte von „Zustandsverschränkungen“ zu bestimmen ist. Aber diese Probleme sind den weiteren Kapiteln vorbehalten.

¹Für Überblicke zur Interpretationslage vgl. Stöckler (2007) und Esfeld (2012).

3 Quanten-Identität und Ununterscheidbarkeit

Holger Lyre

Übersicht

3.1 Quantentheorie gleichartiger Objekte	79
3.2 Ontologie der Quantentheorie	89
Literatur zu Kapitel 3	109

Kapitel 3 steht technisch und sachlich zwischen Kapitel 1 und 6. In Kapitel 1 wurde die 1-Teilchen-Quantenmechanik im Hilbertraum \mathcal{H} eingeführt, das vorliegende Kapitel behandelt n Teilchen im Tensorprodukt-Raum \mathcal{H}_n und Kapitel 6 variable Teilchenzahlen mit Aufsteige- und Absteigeoperatoren im Fockraum $\mathcal{H}_F = \oplus \mathcal{H}_n$. Das Kapitel zerfällt in zwei Teile, wobei 3.1 physikalisch, 3.2 aber stärker philosophisch orientiert ist.

3.1 Quantentheorie gleichartiger Objekte

3.1.1 Statistische Mechanik

Die Quantentheorie hat ihren historischen Ursprung zu einem wesentlichen Teil in der Thermodynamik. Das Problem der Schwarzkörperstrahlung veranlasste Max Planck 1900 dazu, eine neue Ad-hoc-Regel über die Energieverteilung des Strahlungsfeldes eines schwarzen Körpers in Abhängigkeit von der Frequenz zu formulieren und dabei das Plancksche Wirkungsquantum als neue Naturkonstante einzuführen. Dieser Schritt wird allgemein als Geburtsstunde der Quantentheorie angesehen, und man kann sagen, dass das Problem der Schwarzkörperstrahlung eine Anomalie für die klassische Physik darstellt. Eine weitere Anomalie findet sich im Fall der Mischungsentropie gleicher Gase – und dies führt auf das Thema des Kapitels: Sind physikalische Objekte Individuen, d.h., besitzen sie eine sowohl

zeitüberbrückende, diachrone Identität als auch eine synchrone Identität im Sinne ihrer Unterscheidbarkeit von anderen Objekten?

Man betrachte hierzu zwei mit Gas gefüllte Kammern, die durch eine Trennwand separiert sind. Druck und Temperatur seien auf beiden Seiten gleich. Nach Herausnehmen der Trennwand mischen sich die Gase, die innere Energie des Gesamtsystems bleibt unverändert. Handelt es sich um verschiedene Gase, so ist der Prozess irreversibel, und die Entropie, eine Maßgröße für die Anzahl der Mikrozustände in einem gegebenen Makrozustand, steigt. Eine Mischung gleicher Gase sollte jedoch zu keinerlei Entropieanstieg führen, denn die Trennwand kann reversibel wieder eingefügt werden. Dieses Resultat steht in Einklang mit der makroskopischen Sichtweise der phänomenologischen Thermodynamik. Vom mikroskopischen Standpunkt der kinetischen Gastheorie bzw. statistischen Thermodynamik besteht das Gas jedoch aus Molekülen, die Entropie leitet sich nun aus der Maxwell-Boltzmann-Statistik ab und hängt von der Anzahl der Mikrozustände in einem Makrozustand ab. Werden zwei Gase gemischt, so ist es mikroskopisch scheinbar irrelevant, ob es sich um Moleküle einer oder verschiedener Gassorten handelt, denn in jedem Fall mischen sich die Moleküle ja individuell. Nach dieser Betrachtungsweise erhält man eine Erhöhung der Mischungsentropie auch für den Fall gleichartiger Gase auf beiden Seiten des Behälters – im Widerspruch zum Ergebnis der phänomenologischen Thermodynamik. Hierauf hatte Josiah Willard Gibbs Ende des 19. Jahrhunderts erstmals hingewiesen, das Problem ist als Gibbs-Paradox bekannt.

Formal lässt sich der Widerspruch zum Verschwinden bringen, wenn bei der Zählung der Mikrozustände der *Gibbssche Korrekturfaktor* $\frac{1}{N!}$ verwendet wird (wobei N die Teilchenzahl bezeichnet). Offensichtlich besagt dieser Faktor, dass die Zahl der Mikrozustände durch die Zahl ihrer Permutationen geteilt werden muss, was bedeutet, dass aus der Zählung der Mikrozustände die Möglichkeit der individuellen Erfassung eines Zustandes herausgerechnet wird.

Dies lässt sich anschaulich illustrieren. Betrachten wir die kombinatorisch möglichen Verteilungen zweier Teilchen a und b auf zwei Zustände, etwa Zustände verschiedener Energien, hier als Boxen dargestellt:

$$\begin{array}{ll}
 (1) & \begin{array}{|c|c|} \hline ab & \\ \hline \end{array} \\
 (2) & \begin{array}{|c|c|} \hline & ab \\ \hline \end{array} \\
 (3) & \begin{array}{|c|c|} \hline a & b \\ \hline \end{array} \\
 (4) & \begin{array}{|c|c|} \hline b & a \\ \hline \end{array}
 \end{array} \tag{3.1}$$

Im ersten und zweiten Fall befinden sich beide Teilchen jeweils im gleichen Energiezustand, im dritten und vierten Fall in unterschiedlichen Energien. Die Zählung der Besetzungszahlmöglichkeiten hängt nun davon ab, wie man die Fälle (3) und (4) gewichtet. Falls sich nämlich, wie durch den Gibbsschen Korrekturfaktor indiziert, die Objekte a und b nur bis auf Permutation bestimmen lassen, lassen

4 Verschränkung und Nicht-Lokalität: EPR, Bell und die Folgen

Paul Näger und Manfred Stöckler

Übersicht

4.1 Einführung und Überblick	113
4.2 Das EPR-Argument und seine Folgen	115
4.3 Der Bellsche Beweis	124
4.4 Nicht-Lokalität	143
4.5 Alternative Lösungsvorschläge	163
4.6 Resümee	171
Literatur zu Kapitel 4	172

4.1 Einführung und Überblick

Die Probleme, die wir in diesem Kapitel diskutieren, haben ihren formalen Ursprung in der Art und Weise, wie in der Quantentheorie zusammengesetzte Systeme beschrieben werden (vgl. Abschn. 3.1.2). Bei solchen Beschreibungen gibt es einerseits Produktzustände, wie z.B.

$$|\phi\rangle = |\uparrow_a\rangle_1 |\downarrow_a\rangle_2 \quad (4.1)$$

Dieser Zustand soll ein aus zwei Objekten zusammengesetztes System beschreiben, die verschiedenartig sind. Die Indizes 1 bzw. 2 außerhalb der Klammern kennzeichnen, welchem System der Zustand in der Klammer zukommt. $|\uparrow_a\rangle_1$ bedeute z.B., dass das System 1 den Zustand „Spin up“ bzgl. der räumlichen Richtung a hat, $|\downarrow_a\rangle_1$ entsprechend, dass es „Spin down“ in dieser Richtung besitzt. Ganz analog zur klassischen Physik und unseren Intuitionen kann also in Produktzuständen jedem der Teilsysteme ein eindeutiger Zustand zugeschrieben werden.

In der Quantenphysik kann man jedoch im allgemeinen Fall zusammengesetzte Systeme nicht durch Produktzustände charakterisieren, sondern nur durch *Super-*C. Friebe et al., *Philosophie der Quantenphysik*, DOI 10.1007/978-3-642-37790-7_4, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015

positionen von Produktzuständen, d.h. durch sog. *verschränkte Zustände*, wie z.B.

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|\uparrow_a\rangle_1 |\downarrow_a\rangle_2 - |\downarrow_a\rangle_1 |\uparrow_a\rangle_2 \right). \quad (4.2)$$

Im folgenden Abschnitt werden wir solche Zustandsvektoren auch formal genauer analysieren, in dieser Einleitung geben wir zunächst nur einen anschaulichen Überblick. Ein Zustand wie (4.2) beschreibt ein Gesamtsystem, das man sich aus zwei Teilsystemen zusammengesetzt denken kann (wie es die Indizes nahe legen). Im Kontrast zu einem Produktzustand kann er jedoch nicht in Produktform gebracht werden. Dies bedeutet, dass beim Vorliegen des Zustands $|\psi\rangle$ weder dem System 1 noch dem System 2 ein eindeutiger Spinzustand zugeordnet werden kann. D.h. den einzelnen Teilsystemen 1 und 2 kann weder der Zustand Spin-up noch der Zustand Spin-down noch ein Überlagerungszustand beider zugeordnet werden. Der Gesamtzustand (4.2) legt die Zustände der Teilsysteme nicht fest.

Wenn man jedoch an den Systemen 1 und 2 Spin-Messungen durchführt, findet man an den Teilsystemen zufällig verteilte, aber eindeutige Ergebnisse Spin-up bzw. Spin-down, und insbesondere *Korrelationen* zwischen diesen Messergebnissen: Wenn man für System 1 den Zustand $|\uparrow_a\rangle_1$ misst, liegt nach der Messung am System 2 mit Sicherheit der Zustand $|\downarrow_a\rangle_2$ vor, ebenso sind $|\downarrow_a\rangle_1$ und $|\uparrow_a\rangle_2$ korreliert. Diese Korrelationen liegen nach Auskunft der Quantenmechanik auch dann vor, wenn die Orte der Messungen sehr weit voneinander entfernt sind, ja selbst dann, wenn sie so weit voneinander entfernt sind, dass nicht einmal ein Signal mit Lichtgeschwindigkeit diese Korrelation herstellen könnte. Verschränkung etabliert einen besonderen Zusammenhang zwischen den Teilsystemen, der alle üblichen raumzeitlichen Beschränkungen ignoriert.

Solche verschränkten Systeme sind der Grund für fast alle zentralen Probleme der Interpretation der Quantentheorie. Wir sind ihnen bei der Diskussion des Messprozesses (Abschn. 2.3.1) und der quantenmechanischen Beschreibung gleicher Teilchen (Kap. 3) begegnet. Erwin Schrödinger hat die Möglichkeit verschränkter Systeme als *den* charakteristischen Zug der Quantentheorie bezeichnet, der ihre völlige Abweichung von der klassischen Denkweise erzwingt (Schrödinger, 1935b, 555).

In diesem Kapitel konzentrieren wir uns auf diese Korrelationen und damit auf eine besondere Konsequenz der Existenz verschränkter Systeme, die zum ersten Mal in einem berühmten Gedankenexperiment von A. Einstein, B. Podolsky und N. Rosen (1935) hervorgehoben wurde. Der Aufsatz, in dem sie diese wegen der klassisch ganz unerwarteten Korrelationen oft EPR-Paradoxon genannte Situation darstellen und daraus ein Argument entwickeln, hat unübersehbar viele weitere

5 Nicht-Kollaps-Interpretationen der Quantentheorie

Oliver Passon

Übersicht

5.1 Die De-Broglie-Bohm-Theorie	178
5.2 Die Everett-Interpretation	199
5.3 Zusammenhang zwischen den verschiedenen Interpretationen	219
Literatur zu Kapitel 5	221

In Abschnitt 2.3.1 wurde das Messproblem in der Form eines Trilemmas formuliert. Demnach ist entweder (i) die Wellenfunktion keine vollständige Beschreibung, (ii) die Zeitentwicklung nicht durchgängig unitär oder führen (iii) Messungen nicht zu definiten Ergebnissen. Die in Abschnitt 2.3.1 dargestellte GRW-Theorie wählt (ii) – ergänzt die Schrödinger-Gleichung also um einen nichtlinearen Term, der einen physikalischen Mechanismus für den „tatsächlichen“ Kollaps der Wellenfunktion modelliert. Auch die Kopenhagener Deutung leugnet die durchgängige Zeitentwicklung gemäß der Schrödinger-Gleichung; im Gegensatz zur GRW-Theorie wird diesem Vorgang jedoch keine *realistische* Deutung gegeben.

In diesem Kapitel behandeln wir die prominentesten Vertreter der Strategien, entweder die Vollständigkeit der Wellenfunktion zu leugnen (De-Broglie-Bohm-Theorie) oder die Eindeutigkeit der Messergebnisse in Frage zu stellen (Everett bzw. Viele-Welten-Interpretation). In diesen Theorien unterliegt der Zustandsvektor also durchgängig einer unitären Zeitentwicklung. Gemeinsam ist ihnen somit der Verzicht auf den Kollaps der Wellenfunktion; lediglich der *Anschein* dieser nicht-unitären Zustandsänderung muss von ihnen begründet werden. In der englischsprachigen Literatur hat sich deshalb die Bezeichnung *no-collapse interpretations* als Oberbegriff für diese Deutungen eingebürgert.

5.1 Die De-Broglie-Bohm-Theorie

Innerhalb der Deutungsdebatte um die Quantentheorie – vor allem angesichts des Messproblems – stellt sich unmittelbar die Frage danach, ob die Quantenmechanik in der bisherigen Form einfach nur *unvollständig* sei. Ihre statistische Deutung legt die Vermutung nahe, dass ihr eine zusätzliche Struktur zu Grunde läge, mit deren Aufklärung die Interpretation der Theorie eine vollkommen andere Richtung nähme. Da diese zusätzliche Struktur in der herkömmlichen Quantenmechanik unbekannt ist, wurde dieses Forschungsprogramm ursprünglich als die Suche nach „verborgenen Variablen“ bezeichnet.

Im Jahre 1952 veröffentlichte David Bohm die Arbeit *A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of ‚Hidden‘ Variables* (Bohm 1952). Ihm war zu diesem Zeitpunkt unbekannt, dass Louis De-Broglie bereits auf der 5. Solvay-Konferenz 1927 eine mathematisch äquivalente Formulierung dieser Theorie vorgestellt hatte (De-Broglie 1927). Aus diesem Grunde beziehen wir uns auf diese Interpretation als „De-Broglie-Bohm-Theorie“ (DBB-Theorie).¹ De-Broglie selbst bezeichnete sie im Übrigen als Theorie der Führungswelle (*l'onde pilote* bzw. engl. *pilot wave theory*). Der Konferenzband der 5. Solvay-Konferenz ist erst seit 2009 in englischer Sprache zugänglich (vgl. Bacciagaluppi und Valentini 2009). Antony Valentini und Guido Bacciagaluppi haben nicht nur die Übersetzung besorgt, sondern diskutieren in ihrem kenntnisreichen Kommentar ebenfalls die Rolle dieser Konferenz für die Deutung der Quantentheorie im Allgemeinen. Ihrer Analyse zu Folge ist es irreführend, die Bedeutung der 5. Solvay-Konferenz auf die (fraglos wichtigen) Debatten zwischen Bohr und Einstein zu reduzieren. Bacciagaluppi und Valentini plädieren für eine Neubewertung der Rolle De-Brogles innerhalb der frühen Deutungsdebatte und formulieren in diesem Zusammenhang:

„Today, pilot-wave theory is often characterised as simply adding particle trajectories to the Schrödinger equation. An understanding of De-Broglie’s thought from 1923 to 1927, and of the role it played in Schrödinger’s work, shows the gross inaccuracy of this characterisation: after all, it was actually Schrödinger who removed the trajectories from De-Broglie’s theory.“ (Bacciagaluppi und Valentini, 2009, 78)

Eine Debatte um die Priorität bei der Entwicklung der Wellenmechanik kann und soll an dieser Stelle jedoch nicht geführt werden. Wir zitieren diese provokante Passage vor allem deshalb, weil sie die Grundidee der De-Broglie-Bohm-Theorie

¹Bohms Unkenntnis wird verständlich, wenn man weiß, dass De-Broglie selbst seine Theorie nicht weiter entwickelte und vielmehr Anhänger der „konventionellen“ Quantentheorie wurde. Erst unter dem Eindruck der Veröffentlichung von 1952 belebte sich sein Interesse an diesen Fragen erneut.

6 Quantenfeldtheorie

Meinard Kuhlmann und Manfred Stöckler

Übersicht

6.1	Charakterisierung der Quantenfeldtheorie	225
6.2	Raumzeitliche Beschreibung von Prozessen	227
6.3	Mathematische Struktur	229
6.4	Interpretationen der Quantenfeldtheorie	254
6.5	Neue Wege der Interpretation	265
	Literatur zu Kapitel 6	270

6.1 Charakterisierung der Quantenfeldtheorie

Viele ihrer philosophischen Probleme teilt die Quantenfeldtheorie (QFT) mit der Quantenmechanik. Dazu gehören der Messprozess und die damit zusammenhängenden Interpretationsprobleme, zu denen die QFT nichts Neues beiträgt. Auch die Frage, wie die Objekte, die die Theorie beschreibt, in den Raum eingebettet sind, wird schon in der Quantenmechanik diskutiert. Die neuen mathematischen Strukturen der QFT lassen allerdings auch neue Antworten erwarten, so dass die raumzeitliche Interpretation der Theorie ein wichtiges Thema wird. Die QFT scheint auch eine Sicht auf die Unterscheidbarkeit und die Identität der Quantenobjekte und auf die Geltung des Leibniz-Prinzips (vgl. Kap. 3) zu eröffnen, die über die der Quantenmechanik hinaus geht. Die Frage, über welche Art von Gegenständen und Eigenschaften die QFT spricht, hat für klassische Themen der Naturphilosophie eine besondere Bedeutung, weil sie als fundamentale Theorie der Materie für die Ontologie besonders relevant ist. Für die Wissenschaftstheorie ist die QFT reizvoll, weil es sich um eine Theorie handelt, deren Entwicklung noch nicht abgeschlossen ist und deren provisorischer Charakter dafür, wie Physiker wirklich arbeiten, viel typischer ist als die vereinfachten Lehrbuchdarstellungen, auf die sich philosophische Analysen häufig beziehen.

Die QFT ist der mathematische und begriffliche Rahmen, in dem die Physik der Elementarteilchen formuliert ist. Hier wird man beginnen, wenn man untersucht, welches Bild von der Materie die gegenwärtige Physik nahe legt. Allerdings kann

man die Antwort auf diese Fragen nicht einfach aus dem mathematischen Formalismus ablesen. Weder in der Physik noch in der Philosophie herrscht Einigkeit darüber, von welchen Typen von Gegenständen die Theorie handelt. Diese Frage steht im Mittelpunkt der gegenwärtigen philosophischen Debatten über die QFT und bildet auch den Schwerpunkt dieses Kapitels.

In mathematischer Hinsicht kommt man zur QFT, wenn man die heuristischen Verfahren, die von der klassischen Punktteilchen-Mechanik z.B. zur Schrödinger-Gleichung führen, auf klassische Feldtheorien anwendet. In dieser Sichtweise ist die QFT eine Quantentheorie von Systemen mit unendlich vielen Freiheitsgraden. Unter Freiheitsgraden versteht man allgemein voneinander unabhängige Bewegungsmöglichkeiten. So sind z.B. den drei Freiheitsgraden eines Punktteilchens drei unabhängige Ortskoordinaten zugeordnet. Die Anzahl der Freiheitsgrade bestimmt die Anzahl der Angaben, die man braucht, um den Zustand eines Systems zu charakterisieren. Bei einem einzelnen klassischen Teilchen reicht die Angabe der drei Komponenten seines Orts und der drei Komponenten seines Impulses. Zur Charakterisierung eines Feldes müssen für jeden Ort die Feldamplitude und ein zugeordneter Feldimpuls angegeben werden. In mathematischer Hinsicht ähnelt ein Feld also einem System aus unendlich vielen Teilchen, die durch die räumlichen Koordinaten unterschieden werden. Für viele Zwecke kann man das Verhältnis von Quantenmechanik und QFT in diesem Sinn als Übergang von endlich vielen zu unendlich vielen Freiheitsgraden ansehen.

Dieser Übergang ist eigentlich schon notwendig, wenn man die Schrödinger-Gleichung benutzt, um Atomspektren zu berechnen. Die Quantenmechanik ist hier nämlich in einer charakteristischen Weise unvollständig, weil die Wechselwirkung von elektromagnetischer Strahlung und Materie (die ja den Test der Theorie überhaupt erst ermöglicht) dabei ganz ausgeklammert oder nur halbklassisch berücksichtigt wird. Schon in den 20er Jahren des vorigen Jahrhunderts arbeiteten M. Born, W. Heisenberg und P. Jordan sowie P. Dirac an Ansätzen zu einer Quantentheorie des elektromagnetischen Feldes und seiner Wechselwirkung mit der Materie („Feldquantisierung“). Dabei zeigte sich, dass in der QFT Materie (wie Elektronen) und Strahlung (wie Licht) in mathematischer Hinsicht auf ganz ähnliche Weise beschrieben werden können. Im Rahmen der QFT ist es gelungen, frühere eher heuristische Vorstellungen über den Teilchencharakter, den z.B. Licht unter bestimmten Umständen zeigt, und den Wellencharakter, den Materie unter bestimmten Umständen zeigt, in einem einheitlichen mathematischen Formalismus zu erfassen. Zugleich wurde dabei deutlich, dass die alte Einteilung, nach der Materie aus räumlich lokalisierten Teilchen und Strahlung aus räumlich kontinuierlich verteilten Feldern besteht, aufgegeben werden muss. Besonders hervorzuheben ist, dass die QFT auch Systeme und Vorgänge mit veränderlicher Teilchenzahl beschreiben kann, d.h. Prozesse, bei denen Teilchen vernichtet oder erzeugt werden. Dafür hat die Quantenmechanik keine Möglichkeiten.

7 Chronologie und Ausblick

Cord Friebe, Meinard Kuhlmann und Holger Lyre

Übersicht

7.1	Frühphase der Quantenphysik	276
7.2	Etablierung der Standard-Quantenmechanik	277
7.3	Bestätigung und neue Herausforderungen	279

Die folgende Chronologie legt den Fokus auf die Grundlagen und Deutungen der Quantenphysik, sie ist keine Geschichte der Quantenphysik im Ganzen, insbesondere finden die speziellen Entwicklungen der Quantenfeldtheorie und der sich daraus entwickelnden Teilchenphysik keine Berücksichtigung. Dafür kommen neben den im Buch vorrangig behandelten Deutungen (Kopenhagen, GRW, Everett, Bohm) auch viele weitere Interpretationsansätze kurz zur Sprache, die im Rahmen des Buches nicht eingehender behandelt werden konnten, wie etwa

- Bewusstseins-Interpretationen (ab 1928)
- Modal-Interpretationen (ab 1972)
- Konsistente Historien (ab 1984)
- Transaktions-Interpretation (1986)
- Relationale Quantenmechanik (ab 1994)
- Epistemische Interpretationen und Quanten-Bayesianismus (ab 2000)

Insgesamt lässt sich die Entwicklung der Quantenphysik grob in drei Phasen einteilen: In der Frühphase hielt man noch keine geschlossene Theorie in Händen, vielmehr herrschte ein Gemisch von Modellen vor, das neuartige Elemente mit klassischen verband. Die Frühphase begann 1900 mit Plancks Quantenhypothese und endete etwa 1925. Daran schloss sich eine Phase des Durchbruchs und der Etablierung der neuen Theorie, der Quantenmechanik, und eines entsprechenden mathematischen Formalismus an. Sie endete etwa 1935 mit Bohrs Antwort auf die Herausforderung durch das EPR-Gedankenexperiment, womit auch die seit Mitte der 1920er Jahre geführte philosophische Deutungsdebatte um die neu entwickelte Theorie ihren vorläufigen Abschluss fand, da die nunmehr durch Bohr, Heisenberg und andere führende Quantenphysiker propagierte *Kopenhagener Deutung* von der

großen Mehrheit der Physiker – zumindest vorläufig, gewisserweise aber bis zum heutigen Tage – als Standard-Deutung akzeptiert wurde. Seit Ende der 1930er, spätestens im Verlaufe der 1940er Jahre ging die Entwicklung in eine dritte Phase über. Sie ist zum einen durch theoretische Weiterentwicklungen wie relativistische Quantenmechanik, Quantenfeldtheorie und Quantengravitation gekennzeichnet, aber auch durch wichtige experimentelle Bestätigungen der quantenmechanischen Grundlagen, durch die Entwicklung innovativer moderner Gebiete wie etwa der Quanteninformationstheorie sowie schließlich durch die Etablierung abweichender alternativer Deutungsansätze.

7.1 Frühphase der Quantenphysik

1900: Plancks Quantenhypothese. Das klassische Gesetz für das Strahlungsspektrum schwarzer Körper macht die empirisch falsche Vorhersage, dass ein schwarzer Körper bei Erhitzung für hohe Frequenzen Strahlung mit unbegrenzt anwachsender Intensität aussenden müsste („Ultraviolett-Katastrophe“), was der Beobachtung widerspricht. Max Planck löst dieses Problem 1900 mit der herausfordernden Hypothese, dass ein solcher Körper Strahlungsenergie nur portionsweise, in Form von „Quanten“, emittiert. Dies führt zur Einführung einer neuen Naturkonstanten, des Planckschen Wirkungsquantums h .

1905: Einsteins Photoeffekt. In seinem *annus mirabilis* stellt Albert Einstein nicht nur die Spezielle Relativitätstheorie auf, sondern trägt auch zur später von ihm abgelehnten „Quantenspringerei“ bei: Er erklärt den photoelektrischen Effekt durch die Annahme, dass Strahlungsenergie nur portionsweise transportiert werden kann („Photonen“), was den Teilchencharakter der Strahlung verschärft. Für diese Arbeit erhält Einstein 1921 den Nobelpreis für Physik.

1909: „Gott würfelt nicht“. Auf einer Physikertagung in Salzburg äußert Einstein erstmals Bedenken gegen den indeterministischen Charakter der Emittierung und Absorption von Strahlung.

1911–13: Bohrs Atommodell. 1911 entdeckt Ernest Rutherford, dass Atome aus einem positiv geladenen Kern und einer Elektronenhülle bestehen. Den Kern umkreisende Elektronen müssten nach klassischer Auffassung aber Strahlungsenergie abgeben, die Atome folglich instabil sein. Niels Bohr „löst“ dieses Problem 1913 durch die Ad-hoc-Annahme einer Quantelung des Bahndrehimpulses und das Postulat „erlaubter“ Bahnen, zwischen denen die Elektronen bei Aufnahme bzw. Abgabe von Strahlungsquanten springen und auf denen sie strahlungsfrei kreisen. Das Modell erklärt viele Beobachtungsdaten, steht aber in einem ungelösten Widerspruch zur Elektrodynamik.

Register

- Abzählbarkeit
 kardinale, 256–258
 ordinale, 256–258
Äquivalenz von Masse und Energie, 256
Aggregierbarkeit, 256–259
Aharonov-Bohm-Effekt, 283
Algebraische Quantenfeldtheorie, 249–252,
 263, 269
Algebraische Quantenmechanik, 280
Aspect, Alain, 130–131
Aspect-Experiment, 285
Auswahlregel, 87
- Bain, Jonathan, 260
Baker, David J., 258, 260–262, 264, 269
Basis
 eines Vektorraums, 18, 203
 Problem der bevorzugten, 69, 203, 208
Bell, John, 75, 115, 123–143, 283
Bells Theorem, 123–143, 283
Bellsche Ungleichungen, 132, 137, 142, 283
 Herleitung, 141–142
 Verletzung, 132–133, 137, 141
Beobachter, 61
Besetzungszahl, 239
Besetzungszahldarstellung, 239–244
Bewusstseins-Interpretation, 205, 280
Bezugssystem, 147–148, 159–163
 bevorzugtes, 162–163
Blacksche Kugeln, 96
Bohm, David, 119, 125, 178
Bohmsche Mechanik, 194, *siehe*
 De-Broglie-Bohm-Theorie
Bohr, Niels, 115, 117–118, 275, 276
Bohr-Einstein-Debatte, 115–118
Bohrsches Atommodell, 276
Born, Max, 226
Bornsche Regel, 47, 209, 245, 278
Bose, Satyendranath, 83
Bose-Einstein-Statistik, 84, 277
Boson, 85, 87, 101, 103, 106, 243, 265
Bündelontologie, 8, 95, 267–270
- Cartwright, Nancy, 164
Cassirer, Ernst, 100
Cramer, John, 286
- Darstellung
 einer Gruppe, 86, 87
 eines Vektors, 19
Darstellungen, inäquivalente, 249–251
de Broglie, Louis, 178
- De-Broglie-Bohm-Theorie, 177, 178, 186,
 193, 196, 282
 relativistische Verallgemeinerung, 198
 Schulen der, 194
Dekohärenz, 67, 206, 284
Delayed Choice, 285
Determinismus, 9, 131, 138, 183
DeWitt, Bryce, 210
diachrone Identität, 98
Dichtematrix, 35, 208
Dirac, Paul, 226
Dirac-Gleichung, 235, 278
Dirac-Theorie, 198
Diskretheit, 256–258
Doppelspalt, 4, 188, 285
Drehoperator, 22
Dynamik, 58
- Earman, John, 252
ebene Welle, 236
effektive Wellenfunktion, 185, 191
Eichboson, 106
Eichprinzip, 279
Eichtransformation, 266
Eigen
 -raum, 29
 -vektoren, 22
 -zustand, 64
Eigenschaften, 50, 56, 92, 268, 284
 dispositionale, 194
 inkompatible, 230
 kategoriale, 76, 194
 monadische, 266
 permanente, 230
 relationale, 266
 zeitabhängige, 230
Eigenwert, 20, 22, 33
 -gleichung, 46
 -problem, 23
 mehrfacher, 29, 120
Einstein, Albert, 83, 114–117, 124, 125,
 152–153, 279
Einstein-Lokalität, *siehe* Lokalität
Elementarität, 256
Elementarteilchenphysik, 261
Energiebedingung, 256
Energiequanten, 228, 239
Ensemble-Interpretation, 44, 49, 52, 219,
 278
Entropie, 79
Entscheidungstheorie, 212
Environment-induced-decoherence, 68, 208
Environment-induced-superselection, 207
- C. Friebe et al., *Philosophie der Quantenphysik*, DOI 10.1007/978-3-642-37790-7,
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015

- Epistemische Interpretationen, 287
 EPR-Argument, 115–124, 279
 EPR-Gedankenexperiment, 115–116
 EPR-Korrelationen, 114, 120–122, 126–127
 EPR-Paradoxon, *siehe* EPR-Argument
 EPR/B-Experiment, 119, 121, 125–131
 Ereignis, 129
 Ergebnis-Abhängigkeit, *siehe* Outcome
 Dependence
 Erklärungen, kausale, *siehe* kausale
 Erklärungen
 Erwartungswert, 28
 Erzeugungsoperatoren, 237–262
 Esfeld, Michael, 158–159, 266
 Everett, Hugh III, 199
 Everett-Interpretation, *siehe*
 Viele-Welten-Interpretation

 Faktorierbarkeit, 141
 Falkenburg, Brigitte, 263
 Feld
 klassisches, 230
 konjugiertes, 232
 quantenmechanisches, 230
 Feld-Ontologie, 198, 227, 263–265
 Feldgrößen, 230
 Feldimpuls, 232
 Feldinterpretation, 263–265
 Feldoperator, 253, 263
 Feldquantisierung, 231
 Feldtheorie, 229
 Feldzustand, 245, 264
 Fermi-Dirac-Statistik, 84
 Fermi-Druck, 86
 Fermion, 84–87, 100, 103, 105, 243, 265
 Fernwirkung, 147, 149
 Feynman, Richard, 85, 280, 281
 Feynman-Diagramme, 247–248, 281
 Fockraum, 79, 237–247, 257–260
 Fraser, Doreen, 239, 257, 260
 Freiheitsgrad, 226, 228, 231, 233, 234, 240,
 250, 251, 259, 267, 282
 French, Steven, 101
 Führungsfeld, *siehe* Führungsgleichung
 Führungsgleichung, 182
 für N-Teilchen, 185
 für Spin $\frac{1}{2}$ -Teilchen, 185

 gemeinsame Ursache
 nicht-abschirmende, 164–165
 verborgene, 145
 Geometrische Phase, 285
 Ghirardi, Rimini, Weber, 62
 Gibbs-Paradoxon, 80
 Gibbsscher Korrekturfaktor, 80
 Glashow-Salam-Weinberg-Theorie, 283
 Gruppe
 Permutations-, 83
 symmetrische, 83
 GRW-Theorie, 44, 62, 63
 mit Flash-Ontologie, 162

 Haag, Rudolf, 251, 282
 Haagsches Theorem, 240
 Hacking, Ian, 94
 Haecceitismus, 95, 96
 Häufigkeiten
 relative, 52
 Hamilton-Operator, 87, 238, 239, 245
 Hamiltonsche Bewegungsgleichungen, 45
 Hawking-Strahlung, 284
 Heisenberg, Werner, 226, 249, 275, 277
 Heisenberg-Cut, 59
 Heisenbergsche Kommutatorrelationen,
 106
 Heisenbergsche Unschärferelation, 51, 278
 in der DBB-Theorie, 183
 hermitescher Operator, 23, 47
 Higgs-Boson, 106
 Hilbertraum, 28
 Holismus, 157–159, 195
 Huggett, Nick, 258, 259, 264
 Hume, David, 2
 Humesche Supervenienz, *siehe*
 Supervenienz, Humesche
 Hydrodynamische Quantenmechanik, 278
 Hyperebene, raumartige, 160–162
 Hyperebenen-Abhängigkeit, 161–162

 Identität, 89–91, 96, 99, 107, 225
 diachrone, 98, 256–263
 synchrone, 98, 256–262
 Impulsoperator, 39
 Indeterminismus, 9
 Individualität, 89–91, 98, 107
 Inkommensurabilität, 25, 65
 Interferenz, 187
 Interventionsannahme, 166–168
 Irreversibilität, 13, 51

 Jordan, Pascual, 226

 Kant, Immanuel, 91
 Kardinalität, 109
 kausale Erklärungen, 139–141, 163–166
 kausale Markov-Bedingung, *siehe* kausale
 Erklärungen
 kausaler Graph, 129, 140–141, 149, 154
 Kausalität
 in der Raumzeit, *siehe*
 Einstein-Lokalität;
 Nicht-Lokalität

- und Interventionen, *siehe*
 - Interventionsannahme
- und Korrelationen, *siehe* kausale Erklärungen
- und Signale, 147–149
- und Zeit, *siehe* Rückwärtsverursachung
- Klassifikation der Elementarteilchen,
 - gruppentheoretische, 256, 265–266
- Klein-Gordon-Feld, 236
- Klein-Gordon-Gleichung, 235
- Kochen-Specker-Theorem, 194, 283
- Kollaps
 - der Wellenfunktion, 44, 54, 59, 219
 - effektiver, 185
- Kommunikation, 135
- kommutativ, 26, 27
- Kommutator, 27, 230, 231
- kommutieren, 31
- Komplementarität, 2
- Konfigurationsraum, 40, 47, 58, 75, 180, 181, 186, 217, 218
- konjugiert, 231
- Konsistente-Historien-Interpretation, 285
- Kontextualität, 192–195, 219
- Kopenhagener Deutung, 44, 54, 61, 220, 275
- Korrelationen
 - in EPR-Experimenten, *siehe* EPR-Korrelationen
 - und kausale Erklärungen, *siehe* kausale Erklärungen
- Ladyman, James, 265
- Lagrange-Dichte, 236
- Lagrange-Funktion, 232
- Lagrange-Theorie, 232
- Leibniz, Gottfried Wilhelm, 92
- Leibniz-Pauli-Verbot, 99
- Leibniz-Prinzip, vi, 89–109, 225, 258, 260, 261, 268
 - moderates, 105
 - schwaches, 105
 - starkes, 105
- Lewis, David, 90, 153–154
- lichtartig, 128
- Lichtgeschwindigkeit, 127–128, 145–148, 150
- Lichtkegel, 128–129
- Linearkombination, 15
- Lokalisierbarkeit, 256, 262
- Lokalität, 128–130
 - Nicht-, *siehe* Nicht-Lokalität
 - relativistische Begründungen, 147–148
- Lorentz-Invarianz, 160–162
- Madelung, Erwin, 180, 278
- Malament, David, 262
- Many-Minds-Interpretation, 205
- Materiewelle, 277
- Matrix, 22
- Matrizenmechanik, 277
- Maudlin Trilemma, 62, 69, 177, 199
- Maudlin, Tim, 63, 134, 151, 160–162, 216
- Maxwell-Boltzmann-Statistik, 83
- Mehrteilchen-Quantenmechanik, 239
- Mehrteilchen-Zustand, 85
- Mehrteilchensysteme, 33
- Messgerät, 56
- Messproblem
 - in der QFT, 225
 - in der QM, 38, 62, 63
 - Lösung bei Bohm, 190
 - Lösung bei Everett, 216
 - Lösung bei GRW, 71
 - und Dekohärenz, 67, 208
 - und Ensemble-Interpretation, 53
- Messung, 13, 46, 56
- Messwerte, 20
- Minimalinterpretation, 43, 45
- Modal-Interpretationen, 284
- Morganti, Matteo, 267
- Muller, Fred, 105
- Multiplett, 87
- Neumann, Johann von, 194, 279, 280
- Nicht-Lokalität, 128, 143–163, 186
 - Konfliktfelder mit der Relativitätstheorie, 145–148
 - statistische, *siehe* Outcome Dependence; Parameter Dependence
 - und Lorentz-Invarianz, 159–163
 - und Signale, *siehe* Signal, superluminales
- Nicht-Separabilität, 152–157, 159–160
- No-cloning-Theorem, 285
- No-Collapse-Interpretation, 177
- No-go-Theorem, 143, 194
- Observablen-Algebra, 249, 251, 267, 269, 280
- Ontologie, 89, 123, 162, 163, 254–270
 - Bündel-, 95, 267–270
 - der QFT, 254–270
 - Feld-, 198, 227, 263–265
 - Teilchen-, 198, 227, 255–263
 - Tropen-, 95, 267–270
 - Universalien-, 95
- Operator, 20
 - Dichte-, 120
 - Dreh-, 22
 - Erzeugungs-, 237–262
 - Feld-, 253, 263
 - Hamilton-, 87, 238, 239, 245

- hermitescher, 23, 46, 47
- Impuls-, 39
- in der QFT, 230
- linearer, 21
- Nabla-, 235
- Orts-, 39
- Permutations-, 88
- selbstadjungierter, 23
- Teilchenzahl-, 240
- und naiver Realismus, 194
- unitärer, 37
- Vernichtungs-, 238–248
- Zeitentwicklungs-, 37
- Orbitalmodell, 30
- Orthonormalbasis, 18, 24
- Ortsoperator, 39
- Oszillator
 - harmonischer, 239
- Outcome Dependence, 145, 149–151

- Para-Statistik, 85
- Parameter Dependence, 145, 149–151
- Parameter-Abhängigkeit, *siehe* Parameter Dependence
- Partikularismus, 157–159
- Pauli, Wolfgang, 84, 103, 277
- Pauli-Gleichung, 192
- Paulisches Ausschließungsprinzip, 84, 277
- Permutationsinvarianz, 106
 - bosonischer Zustände, 84
 - von Mehrteilchen-Zuständen, 266
- Permutationsoperator, 88
- Pfadintegral, 280
- Phasenraum, 45
- Photoeffekt, 276
- Physikalismus, 205
- Plancksches Wirkungsquantum, 276
- Podolsky, Boris, 114–117, 125, 279
- Produktzustand, 121
- Projektionsoperator, 33
- Projektionspostulat, 28, 61
- Propensitäten, 59
- Propensitätsinterpretation, 258
- Punktmechanik, 233

- Quanta-Interpretation, 242, 244, 258–262
- Quanten-Bayesianismus, 287
- Quanten-Zenon-Effekt, 285
- Quantenchromodynamik, 283
- Quantencomputer, 285
- Quantenelektrodynamik, 280
- Quantenfeldtheorie, 225–273
 - algebraische, 230, 249–252, 263, 269
 - axiomatische und algebraische, 282
 - konventionelle, 249
 - relativistische, 262
- Quantengleichgewichtshypothese, 183
- Quantengravitation, 281
- Quanteninformation, 285
- Quantenkryptographie, 286
- Quantenlogik, 279
- Quantenmechanik
 - algebraische, 280
- Quantenpotenzial, 195
- Quantenschleifen-Gravitation, 286
- Quantenstatistik, 83
- Quantenteleportation, 287
- Quantisierung, 231
 - erste, 235, 236
 - zweite, 236
- Quine, Willard V. O., 89, 103

- Raum-Zeit-Diagramm, 127–129
- raumartig, 128, 145–147, 160
- Raumzeit, 128–129, 162–163
 - gekrümmte, 259, 261, 270
- Raumzeit-Konventionalismus, 94
- Realismus, 124
 - in Bezug auf Operatoren, 194
 - struktureller, *siehe* Strukturenrealismus
 - wissenschaftlicher, 215
- Realität, 55, 75, 115
- Redhead, Michael, 103, 252
- Reichenbach, Hans, 229
- Reichenbachsches Prinzip der gemeinsamen Ursache, 140, 163–164
- Relation, 267
- Relationale Quantenmechanik, 287
- Relative-state-Interpretation, 199
- Relativitätsprinzip, 148, 159–163
- Relativitätstheorie, 127–130, 145–150, 159–163, 233–235, 251
 - allgemeine, 277
- Renormierung, 252
- Rindler-Quanten, 258
- Rosen, Nathan, 114–117, 125, 279
- Rückwärtsverursachung, 168–171
- Ruetsche, Laura, 250, 270

- Saunders, Simon, 103, 105, 212
- Schrödinger, Erwin, 114, 118–119, 217
- Schrödinger-Gleichung, 38, 179
- Schrödingers Katze, 59, 118–119, 279
- Separabilität, 152–154
 - Nicht-, *siehe* Nicht-Separabilität
- Shor-Algorithmus, 287
- Signal, superluminales, 147–151, 155
- Simons, Peter M., 268
- Simultaneität, 147–148, 159–161
- Singulett-Zustand, 88, 120, 158
- Skalarprodukt, 18, 37
- Solvay-Konferenz (1927), 178, 278
- Spin, 6, 192

- Spin-Statistik-Theorem, 85
 Spontaner-Kollaps-Theorie, 286
 Stachel, John, 108, 266
 Statistik
 Bose-Einstein-, 84
 Fermi-Dirac-, 84
 Maxwell-Boltzmann-, 83
 Statistischer Operator, 35
 Stern-Gerlach-Experiment, 5, 203, 277
 in der DBB-Theorie, 192
 Streuexperiment, 244–248
 Streumatrix, 247
 Streuprozess, 244
 Stringtheorie, 286
 Struktur
 Überschuss-, 259
 Strukturenrealismus, 108–109, 265–267
 eliminativer, 265
 nicht-eliminativer, 265
 ontischer, 265–267
 Superauswahlregel, 18, 86, 87
 Superdeterministische Struktur, 167
 Superposition, 16, 28, 60
 und Verschränkung, 114, 118, 121–122
 Superselection, 207
 Supervenienz, 152–159
 Humesche, 153
 Symmetrieforderung, 260
 symmetrische Gruppe, 83
 Symmetrisierungspostulat, 86
 synchrone Identität, 98
- Teilchen,
 virtuelle, 247–248
 Teilchen-Ontologie, 198, 227, 255–263
 Teilchenbegriff, 256
 Teilcheninterpretation, 255–263
 Teilchenspuren, 244
 Teilchenzahloperator, 240
 Teller, Paul, 256–259, 261
 Tensorprodukt, 81, 119–120, 243
 Trajektorien, 227, 244
 der Bohmschen Teilchen, 186–190
 Transaktions-Interpretation, 286
 Triplett-Zustand, 88
 Tropenontologie, 95, 267–270
 tropenontologische Interpretation der
 QFT, 269–270
 Tunneleffekt, 187
 Typisch-sein, 184
- Überlichtgeschwindigkeit, *siehe*
 Lichtgeschwindigkeit
 Umgebung, 206
 Undurchdringbarkeit, 91
 unitärer Operator, 37
 Universalien, 90, 268
- Universalienontologie, 95
 Unruh-Effekt, 250, 258, 269, 284
 Unschärferelation, *siehe* Heisenbergsche
 Unschärfeelation
 Unterscheidbarkeit, 103, 241, 242
 absolute, 104
 relative, 104
 schwache, 104
 Ununterscheidbarkeits-Postulat, 81, 260
 Unvollständigkeit, vii, 49
 Unwissen, 49
 Ursache, gemeinsame, *siehe* gemeinsame
 Ursache
- Vakuumzustand, 237, 238, 244, 248, 250,
 258, 259, 270
 Vektor, 16
 Vektorraum, 16
 Basis, 18
 Darstellung einer Gruppe, 87
 Dimension, 18
 euklidisch, 18
 verborgene Variable, 117, 123–124,
 131–134, 193
 Beweis der Unmöglichkeit von, 194
 Vernichtungsoperatoren, 238–248
 verschränkte Systeme, *siehe*
 Verschränkung
 verschränkter Zustand, *siehe*
 Verschränkung
 Verschränkung, 57, 67, 114–123, 125, 131,
 156, 158–159, 165
 Vertauschungsrelationen, 230, 231
 Viele-Welten-Interpretation, 69, 199, 201,
 282
 und Entscheidungstheorie, 212
 Variante von Deutsch (1985), 204
- Wahrscheinlichkeit, 20
 Übergangs-, 246
 in der Everett-Interpretation, 209–215
 Wahrscheinlichkeitsdichte, 47
 Wallace, David, 201, 204, 208, 212
 Wasserstoffatom, 30, 187
 Wave Function Ontology, 77
 Wayne, Andrew, 267
 Weingard, Robert, 258, 259
 Welle
 ebene, 236
 Wellenfunktion, 71
 des Universums, 184
 effektive, 185, 191
 Kollaps, 44, 54, 59
 leere, 221
 Mehrteilchen-, 84
 Wellenmechanik, 277
 Weyl, Hermann, 98–101, 103, 279

Wheeler-DeWitt-Gleichung, 283
Wiederholungsmessung, 7
Wigner, Eugene, 266, 283
Wigners Freund, 59, 283

Yang-Mills-Theorie, 282

Zeilinger, Anton, 131, 287
zeitartig, 128
Zeitentwicklungsoperator, 37
Zustand, 27

Autoren

Cord Friebe studierte Philosophie, Physik und Mathematik in Freiburg/Br. und Padua. Promotion 1998 mit einer Arbeit zur Ontologie „ununterscheidbarer“ Objekte in Quantenmechanik und Quantenfeldtheorie. Forschungsschwerpunkte: Philosophie der Physik, Analytische Ontologie, Theoretische Philosophie Kants. Forschungsaufenthalte in Trient und Sydney; Lehrtätigkeit in Freiburg/Br., Bonn, Saarbrücken und Köln. Letzte Buchveröffentlichung: *Zeit–Wirklichkeit–Persistenz. Eine präsentistische Deutung der Raumzeit* (mentis, 2012).

Meinard Kuhlmann studierte Physik und Philosophie an den Universitäten Bochum, München, St. Andrews (Schottland) und Köln, 1995 Diplom in Physik in Köln; 2000 Promotion in Philosophie und 2008 Habilitation in Bremen. Forschungsaufenthalte als Visiting Fellow o.ä. an den Universitäten Chicago und Irvine (1998), Oxford (2002/03), Pittsburgh (2010) und LSE London (2011). Seit 2012 ist er Sprecher der Arbeitsgemeinschaft *Philosophie der Physik* der Deutschen Physikalischen Gesellschaft. 2010–2012 Lehrstuhlvertretungen an den Universitäten Hannover und Jena. Seit 2012 vertritt er die Professur für Wissenschaftsphilosophie an der Universität Bielefeld. Seine Hauptarbeitsgebiete sind Wissenschaftstheorie, Naturphilosophie und Analytische Ontologie; dabei speziell die Ontologie physikalischer Theorien, Erklärungstheorien sowie die Philosophie komplexer Systeme (insb. Econophysics). Buchveröffentlichungen: *Ontological Aspects of Quantum Field Theory* (hg. mit H. Lyre und A. Wayne, 2002); *The Ultimate Constituents of the Material World - In Search of an Ontology for Fundamental Physics* (2010).

Holger Lyre studierte Physik, Philosophie und Neuroinformatik an den Universitäten Marburg, Dortmund und Bochum. 1993 Diplom in Physik in Dortmund, 1996 Promotion in Philosophie in Bochum und 2003 Habilitation in Bonn. 2006–2009 Lehrstuhlvertretungen in Bielefeld und Augsburg, seit 2009 Professor für Theoretische Philosophie/Philosophie des Geistes an der Universität Magdeburg. Auslandsforschungsaufenthalte an den Universitäten Pittsburgh (1998/99) und San Diego (2014), seit 2011 Gründungsvorsitzender der Gesellschaft für Wissenschaftsphilosophie (GWP). Hauptarbeitsgebiete: Wissenschaftsphilosophie (speziell Philosophie der modernen Physik und Wissenschaftstheorie der kognitiven Neurowissenschaften) sowie Philosophie des Geistes. Monographien: *Quantentheorie der Information* (1998); *Ontological Aspects of Quantum Field Theory* (hg. mit M. Kuhlmann und A. Wayne, 2002); *Informationstheorie. Eine philosophisch-naturwissenschaftliche Einführung* (2002); *Lokale Symmetrien und Wirklichkeit* (2004); *C. F. v. Weizsäcker: The Structure of Physics* (hg. mit T. Görnitz, 2006); *Kants ‘Prolegomena’: Ein kooperativer Kommentar* (hg. mit O. Schliemann, 2012).

Paul Näger studierte Physik und Philosophie in München (2006 Diplom in Physik, LMU München). Nach einem Forschungsaufenthalt in Oxford (2008/09) war er 2010–2013 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Bremen, wo er mit einer wissenschaftsphilosophischen Arbeit zu kausalen Erklärungen für verschränkte Quantensysteme promoviert wurde. Seit 2013 forscht und lehrt er als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster. Seine bisherigen Arbeitsschwerpunkte liegen in der Philosophie der Physik (insb. Quantenphysik, Relativitätstheorie), der Wissenschaftsphilosophie (insb. statistische Methoden und kausales Schließen, Erklärungen, Realismus) und in der Metaphysik (insb. Raum und Zeit, Kausalität).

Oliver Passon studierte Physik, Mathematik, Philosophie und Erziehungswissenschaften an der Universität Wuppertal. Diplom (1998) und Promotion (2002) in der experimentellen Elementarteilchenphysik mit einer Datenanalyse für das DELPHI Experiment am Europäischen Labor für Hochenergiephysik (CERN) in Genf. Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Forschungszentrum Jülich im Zentralinstitut für Angewandte Mathematik (2004–2007). Referendariat für das Lehramt Physik und Mathematik (2. Staatsexamen 2008). Lehrer für Physik und Mathematik am Carl-Duisberg Gymnasium in Wuppertal (bis 2013). Seit 2013 akademischer Rat in der Arbeitsgruppe Physik und ihre Didaktik der Bergischen Universität Wuppertal und Mitglied des Interdisziplinären Zentrums für Wissenschafts- und Technikforschung (IZWT). Zu den Hauptarbeitsgebieten gehören Phänomenologische Optik, Wissenschaftstheorie und Interpretation der Quantenmechanik. Monographien: Bohmsche Mechanik (Harri Deutsch, 2004, 2. Verbesserte Auflage 2010).

Manfred Stöckler studierte Physik und Philosophie in Heidelberg und Gießen und wurde nach einem Diplom in Theoretischer Atomphysik mit einer Arbeit über Philosophische Probleme der Relativistische Quantenmechanik zum Dr. phil. promoviert (1984). Thema der Habilitationsschrift war eine philosophische Untersuchung der Elementarteilchenphysik und der Grundlagen der Quantenfeldtheorie. Akademische Stationen: Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Zentrum für Philosophie und Grundlagen der Wissenschaften in Gießen und am Philosophischen Seminar der Universität Heidelberg. Forschungsaufenthalte am Center for Philosophy of Science in Pittsburgh und am Minnesota Center for Philosophy of Science (Minneapolis). Seit 1991 Professor für Theoretische Philosophie mit dem Schwerpunkt Naturphilosophie und Philosophie der Naturwissenschaften an der Universität Bremen. Arbeitsschwerpunkte: Philosophische Probleme der gegenwärtigen Physik (insbesondere der Quantentheorie und der Kosmologie), Philosophie der Zeit, methodologische Probleme bei der Erforschung komplexer Systeme.