

PHYSIK  
OHNE  
REALE

Physik ohne Realität: Tiefsinn oder Wahnsinn?

H. Dieter Zeh

# Physik ohne Realität: Tiefsinn oder Wahnsinn?

 Springer

Prof. Dr. H. Dieter Zeh  
Gaiberger Straße 38  
69151 Waldhilsbach  
Deutschland  
[www.zeh-hd.de](http://www.zeh-hd.de)

ISBN 978-3-642-21889-7                      e-ISBN 978-3-642-21890-3  
DOI 10.1007/978-3-642-21890-3  
Springer Heidelberg Dordrecht London New York

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

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

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.

*Einbandentwurf:* wsp design Werbeagentur GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier

Springer ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media ([www.springer.com](http://www.springer.com))

# Vorwort

Während ich die meisten meiner wissenschaftlichen Publikationen in englischer Sprache verfasst habe, sind auch eine ganze Reihe vorwiegend an ein allgemeineres Publikum gerichteter Arbeiten auf deutsch erschienen. Insbesondere in den letzten Jahren habe ich zudem diverse didaktisch gemeinte „WebEssays“ als Antworten auf häufig gestellte Fragen auf meine website gestellt. Sie scheinen sich dort inzwischen einer gewissen Beliebtheit zu erfreuen, so dass ich mich entschlossen habe, sie und andere deutschsprachigen Aufsätze über physikalische Grundlagenthemen in Buchform zusammenzufassen. Dabei habe ich auch einige zum Teil bereits publizierte ältere Arbeiten berücksichtigt, die nicht nur historisch von Interesse sein könnten. Als Ergänzung habe ich zudem drei Übersetzungen aus dem Englischen sowie zwei Arbeiten, die ich aus unterschiedlichen Gründen in ihrem originalen Englisch belassen habe, aufgenommen. Mehrere Beiträge habe ich für diesen Zweck überarbeitet, wobei ich jedoch „historische“ Arbeiten älteren Datums bis auf wenige Trivialkorrekturen und gelegentliche Querverweise in ihrem Ursprungszustand belassen habe.

Wegen ihrer unterschiedlichen Herkunft unterscheiden sich die Beiträge zum Teil auch in ihrer Form. Einige enthalten „wissenschaftliche“ Literaturangaben, andere enthielten ursprünglich weblinks, die ich hier weggelassen oder durch Hinweise in anderer Form ersetzt habe. In diesen Fällen verweise ich auch auf meine website [www.zeh-hd.de](http://www.zeh-hd.de), wo die Originale (zum Teil in einer früheren Version) vorerst noch zu finden und die links durch „Mausklicken“ leicht zu verfolgen sind.

Obwohl sich die Arbeiten auf verschiedene Gebiete der Physik beziehen oder zu unterschiedlichen Zeiten und für eine unterschiedliche Leserschaft geschrieben wurden, sind sie praktisch alle der Suche nach einer einheitlichen und begrifflich konsistenten Beschreibung der Natur in der modernen Physik gewidmet. Diese Suche nach konsistent anwendbaren und beobachterunabhängigen Begriffen wird häufig auch als das Problem einer *physikalischen Realität* verstanden, die für den Bereich der Mikrophysik bei vielen Physikern und Laien durch die quantenmechanischen Unschärferelationen oder den Begriff der Komplementarität als widerlegt gilt. Ich habe diese Betrachtungsweise allerdings stets als ein rein verbales Ausweichmanöver angesehen, das entweder der Verschleierung ungelöster Probleme oder der Vermeidung ungewöhnlicher und unerwünschter Konsequenzen dient. So eliminiert der Verzicht auf eine mikroskopische Realität einen der bis dahin methodisch erfolgreichsten Konsistenztests der theoretischen Physik: das Gedankenexperiment. Ist es

doch nun zum Beispiel nicht mehr erlaubt, den Ort eines Elektrons nur konsistent zu „denken“, *obwohl* man davon ausgeht, dass ein solcher bei einer entsprechenden Messung in Erscheinung tritt (was aber zweifelhaft ist).

Einige der Begründer der Quantentheorie wurden bei der Interpretation ihrer Entdeckungen offenbar nicht unerheblich von weltanschaulichen Motiven zur Überwindung eines mechanistischen Weltbildes geleitet, die – für Laien vielleicht überraschend – gerade bei den Physikern der zwanziger Jahre des vorigen Jahrhunderts sehr verbreitet waren (s. etwa das Buch von Karl von Meyenn über „Quantenmechanik und Weimarer Republik“, Vieweg 1994, das auf Thesen des amerikanischen Wissenschaftshistorikers Paul Forman beruht, oder Mara Bellers „Quantum Dialogue“, University of Chicago Press, 1992). Zwar hat auch Einstein für die in seiner Theorie formulierte Revolution physikalischer Grundbegriffe zunächst einen operationalistischen Zugang benutzt, der aber unter dem Einfluss von Hermann Minkowski bald durch die konsistente Annahme einer „objektiven“ oder „realen“ vierdimensionalen Raumzeit (damals ebenfalls „Welt“ genannt) ersetzt wurde. Da Einstein als Anhänger eines Humeschen Positivismus seine gekrümmte Raumzeit aber nicht als wirklich beweisbar sondern nur als durch ihre funktionale Nützlichkeit begründet (also im Prinzip als fiktiv) ansah, mag ihm das nicht einmal als ein wesentlicher Unterschied erschienen sein (s. a. die Beiträge [Kap. 2](#), [5](#) und [15](#)). Eine heuristische Fiktion als Kandidat für die Realität muss aber auf jeden Fall *konsistent* anwendbar sein.

Diese, meines Erachtens auch in der Quantentheorie erfolgreiche Suche nach einer (fiktiven aber konsistenten) realen Welt erklärt auch den Titel, unter den ich diese Sammlung von Aufsätzen gestellt habe. In diesem Sinne kann man vielleicht Hugh Everett als den Minkowski der Quantentheorie bezeichnen. Max Tegmark hat dessen Interpretation als die „Vogelperspektive“ dieser Theorie bezeichnet – im Gegensatz zu der unserer physikalischen Situation als Beobachter entsprechenden Froschperspektive, auf die sich etwa die Kopenhagener Deutung beschränkt.

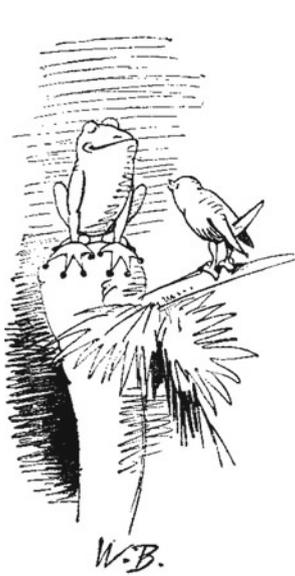
Am Ergebnis zeigt sich aber trotz der dabei angenommenen universellen und sogar deterministischen Naturbeschreibung, dass die von vielen Menschen als Bedrohung angesehene Berechenbarkeit „unserer“ Welt durch die Eigenheiten der Quantentheorie schon im Prinzip (also nicht nur praktisch, wie etwa in der Chaostheorie diskutiert) derart eingeschränkt ist, dass unser menschliches und persönliches Schicksal keineswegs durch die Naturgesetze festgelegt ist. Der Determinismus gilt lediglich für die uns eben nur teilweise zugängliche Quantenwelt im Ganzen. Diese muss sich jedoch auf Grund der unitären Quantendynamik ständig in viele nur separat wahrnehmbare „Welten“ aufteilen, was subjektiv viele beobachtbare „Zukünfte“ zulässt. Deren Realität ist zwar letztendlich eine Definitionsfrage, für die jedoch die Konsistenz der Gesamtbeschreibung eine entscheidende Bedingung sein sollte. Diese erfordert aber eine subtile Betrachtung jenseits aller Vorurteile, wobei jede Entscheidung über die so zu wählende Definition tiefgreifende Konsequenzen für das resultierende Weltbild haben muss (s. [Kap. 18](#) und [22](#)).

Ich danke vor allem Erich Joos sehr herzlich für diverse Korrekturvorschläge und seine sorgfältige Durchsicht des Manuskripts. Angela Lahee vom Springer-Verlag bin ich für Ihre Unterstützung des Projekts zu Dank verpflichtet. Für die Einwilligung, bereits veröffentlichte Arbeiten in zum Teil leicht modifizierter Form

in das Buch aufnehmen zu dürfen, danke ich dem Verlag Vittorio Klostermann, Frankfurt, (Kap. 2 und 15), dem Spektrum der Wissenschaft (Kap. 3 und 8), den Physikalischen Blättern (jetzt Physical Journal – Kap. 7 und 19), dem Verlag Duncker und Humblot, Berlin, (Kap. 16) und dem European Physical Journal H (Kap. 22).

### Vogelperspektive eines Frosches – so oder so?

- frei nach Wilhelm Busch<sup>1</sup> -



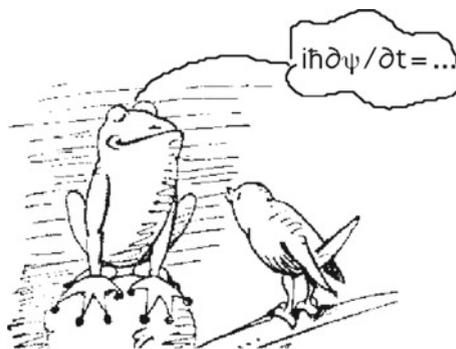
Wenn einer, der mit Mühe kaum  
Gefroschen ist auf einen Baum,



Schon meint, daß er ein Vogel wär,



So irrt sich der.



Doch hat das Fröschlein Phantasie,  
gelenket vom Verstande,  
vermag's zu schauen vogelgleich  
weit über alle Lande.

<sup>1</sup> Wilhelm Busch: Der fliegende Frosch (Hernach)

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung als Lesehilfe</b>	<b>1</b>
<b>Teil I Wellenfunktion und Realität</b>		
<b>2</b>	<b>Realität und Determinismus in der Quantentheorie</b>	<b>13</b>
1	Vorbemerkungen	13
2	Der Realitätsbegriff in der Quantenmechanik	14
3	Weltanschauliche Hintergründe	18
4	Positivismus	19
5	Der Indeterminismus der Quantentheorie	21
6	Operationalismus und/oder Fiktionalismus	22
7	Die umstrittene Realität der Wellenfunktion	24
	Literatur	25
<b>3</b>	<b>Wozu braucht man „Viele Welten“ in der Quantentheorie?</b>	<b>27</b>
1	Worum geht es?	27
2	Der Quanten-Messprozess	32
3	Müssen <i>alle</i> „Welten“ tatsächlich existieren?	36
4	Alles nur eine Frage der Interpretation?	38
5	Haben die „anderen Welten“ irgendwelche Konsequenzen?	42
<b>4</b>	<b>Von „Vielen Welten“ zur Quanten-Dekohärenz?</b>	<b>45</b>
<b>5</b>	<b>Physik ohne Realität: Tiefsinn oder Wahnsinn?</b>	<b>47</b>
1	Vorbemerkung	47
2	Historisches zum Realitätsbegriff in der Physik	47
3	Heisenberg, Schrödinger und Dirac	51
4	Nichtlokalität und Dekohärenz	55
5	John Stewart Bell und die Realität	59
	Literatur	62
<b>6</b>	<b>Wie viele Everett-Welten gibt es eigentlich?</b>	<b>65</b>
<b>7</b>	<b>Rezension zu „Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics“</b>	<b>71</b>

**Teil II Dekohärenz und Quantenmessprozess**

- 8 Ist das Problem des quantenmechanischen Messprozesses nun endlich gelöst?** . . . . . 75
- 9 Dekohärenz und andere Quantenmissverständnisse** . . . . . 77
  - 1 Heisenbergsche Schnitte . . . . . 77
  - 2 Populäre Mißverständnisse über die Quantentheorie . . . . . 84
- 10 Das Wesen des Dekohärenzkonzepts** . . . . . 89
- 11 Wie groß ist ein Photon?** . . . . . 95
  - Literatur . . . . . 101
- 12 Probleme der Quantentheorie** . . . . . 103
- 13 Wurzeln des Dekohärenzkonzepts in der Kernphysik** . . . . . 109
  - 1 Definitionen und Begriffe . . . . . 109
  - 2 Historische Wurzeln in der Kernphysik . . . . . 111
  - 3 Die Emergenz klassischer Eigenschaften in der Quantentheorie . . . . . 114
  - Literatur . . . . . 117
- 14 Feynman’s Interpretation of Quantum Theory (in english)** . . . . . 119
  - 1 Introduction . . . . . 119
  - 2 Commented Excerpts from Session 8 of WADC TR 57-216 . . . . . 120
  - 3 Some Remarks from Session 9 . . . . . 128
  - References . . . . . 130

**Teil III Zeit und Raumzeit**

- 15 Die relativistische Raumzeit-Geometrie in räumlicher Veranschaulichung** . . . . . 135
  - 1 Absoluter Raum und die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit . . . . . 135
  - 2 Die formale Struktur der Minkowski-Welt . . . . . 142
  - 3 Physikalische Implikationen der Minkowski-Metrik und des Relativitätsprinzips . . . . . 143
  - 4 Die Raumzeit der Allgemeinen Relativitätstheorie . . . . . 148
- 16 Über die „Zeit in der Natur“** . . . . . 151
  - 1 Vorbemerkungen . . . . . 151
  - 2 Zeit und Bewegung . . . . . 153
  - 3 Fluss der Zeit und Irreversibilität . . . . . 154
  - 4 Die Zeit in der „neueren“ Physik . . . . . 158
  - 5 Die verlorene Zeit . . . . . 162
  - Literatur . . . . . 164

**17 Was heißt: es gibt keine Zeit?** . . . . . 165  
 Literatur . . . . . 168

**18 Warum Quantenkosmologie?** . . . . . 169  
 1 Das Problem . . . . . 169  
 2 Quantentheorie erfordert Quantenkosmologie . . . . . 172  
 3 Einige Grundbegriffe und Konsequenzen der  
 Quantengravitation . . . . . 174  
 Literatur . . . . . 180

**19 Die Suche nach dem Urzeitpfeil** . . . . . 181  
 Literatur . . . . . 186

**20 Der Zeitbegriff in der Quantentheorie** . . . . . 189  
 Literatur . . . . . 196

**21 Ist M-Theorie Physik?** . . . . . 197

**22 The Nature and Origin of Time-Asymmetric Spacetime  
 Structures (in english)** . . . . . 201  
 1 Introduction . . . . . 201  
 2 Black Hole Spacetimes . . . . . 202  
 3 Black Hole Thermodynamics . . . . . 205  
 4 Expansion of the Universe . . . . . 208  
 5 Quantum Gravity . . . . . 211  
 References . . . . . 215

**Anhang: Liste wissenschaftlicher Publikationen des Autors  
 zum Themenkreis des Buches** . . . . . 217

# Kapitel 1

## Einführung als Lesehilfe

*Unser Problem ist nicht, dass wir unsere Theorien zu ernst nehmen, sondern dass wir sie nicht ernst genug nehmen.*

*Stephen Weinberg*

Fast alle Beiträge dieses Sammelbands sind unabhängig voneinander entstanden, so dass sie im Prinzip auch unabhängig voneinander gelesen werden können. Diese Tatsache erklärt auch einige Wiederholungen – vornehmlich jedoch von Argumenten, die in der Literatur immer wieder missverständlich oder falsch wiedergegeben werden. Es dürfte aber trotzdem hilfreich für den Leser sein, sich für eine bestimmte Reihenfolge zu entscheiden, die von seinen Interessen und seinem Vorwissen abhängen muss.

Ich habe die Arbeiten einerseits in drei Gebiete eingeteilt (s. das Inhaltsverzeichnis), die allerdings eng zusammenhängen und sich daher zum Teil thematisch überschneiden – insbesondere die Gebiete I und II. Andererseits sind sie im Ganzen und im Rahmen des Möglichen so angeordnet, dass ihre Voraussetzungen und Ansprüche im Verlauf des Buches wachsen, so dass diese Reihenfolge für den normalen Leser auch empfehlenswert sein dürfte (wobei man es sogar vorziehen mag, [Kap. 2](#) und [3](#) vor einigen Ausführungen in dieser Einführung zu lesen). Ein Physiker hingegen, dem die „Viele-Welten-Interpretation“ noch suspekt erscheint, mag es vorziehen, mit den Beiträgen zu Dekohärenz (Teil II) zu beginnen. Für historisch Interessierte mit entsprechendem Hintergrundwissen könnte es wiederum interessanter sein, zuerst die Arbeiten von Teil II in umgekehrter Reihenfolge (das ist bei den älteren Arbeiten auch die chronologische Reihenfolge) zu lesen und vielleicht sogar mit Feynmans Argumenten von 1957 aus [Kap. 14](#), die ich selber erst vor ein paar Jahren entdeckt und anschließend kommentiert habe, zu beginnen. Der erste Beitrag von Teil III ([Kapitel 15](#)) ist unabhängig von I und II; die nachfolgenden beziehen sich zunehmend auch auf Konsequenzen einer in I und II diskutierten universellen Quantentheorie.

Wie sich aus den Publikationsdaten der älteren Beiträge ergibt, begann meine eigene aktive Beschäftigung mit Grundlagenproblemen der Quantentheorie um 1967. Zwar hatten mich deren Merkwürdigkeiten schon vor Beginn meiner Studentenzeit gereizt, den konkreten Anlass bildeten jedoch einige Verständnisfragen aus meinem

damaligen Arbeitsgebiet: der theoretischen Niederenergie-Kernphysik. Obwohl dieses Gebiet zu jener Zeit rein pragmatisch betrieben wurde (alle Grundlagenprobleme der Quantentheorie galten als durch Niels Bohr gelöst), erwies es sich dadurch für mich als anregend, dass schwere Atomkerne zwar einerseits noch eindeutig mikroskopische Systeme sind, die aus Nukleonen – also Protonen und Neutronen – bestehen und genau wie Atome oder kleine Moleküle in Energieeigenzuständen auftreten, ihre Spektren aber andererseits auf gewisse makroskopische Freiheitsgrade, wie kollektive Schwingungen und Rotationen, hinweisen. So konfrontierte mich J.H.D. Jensen schon während meiner Diplomarbeit mit der Frage, wieso ein Atomkern denn überhaupt rotieren oder schwingen könne (was im Widerspruch zu seinem erfolgreichen Schalenmodell für sich in separaten Wellenfunktionen befindende Nukleonen zu stehen schien). Eine begriffliche Brücke dazu ergab sich aus Arbeiten von John Wheeler über Kernschwingungen sowie R. Peierls und J. Yoccoz über rotierende Kerne, wonach jeweils die Wellenfunktionen der individuellen Nukleonen den angenommenen kollektiven Bewegungen „folgen“. Diese Beschreibung, die der erfolgreichen Born-Oppenheimer-Methode bei Molekülen ähnelt, ist im Ansatz halbklassisch, doch lässt sich die klassische Zeitabhängigkeit der kollektiven Bewegung quantenmechanisch in eine *zeitunabhängige Superposition* der unterschiedlichen kollektiven Positionen, die einen Energieeigenzustand beschreiben kann, übersetzen. In anderen Anwendungsgebieten, wie bei Festkörpern, in der Hydrodynamik oder sogar schon bei großen Molekülen, wäre dieser kollektive Quantenaspekt gar nicht in Erscheinung getreten, weil diese Objekte tatsächlich in zeitabhängigen („klassischen“) Zuständen statt in diskreten Energieeigenzuständen beobachtet werden. Was aber macht diesen Unterschied aus?

Hier begegnete ich also zum ersten Mal dem Übergang von der Quantenmechanik zur klassischen Physik, für den das Dekohärenzkonzept so bedeutsam werden sollte. Überhaupt findet man in den Methoden zur Behandlung von Mehrteilchenproblemen eine merkwürdige Vermischung von klassischen und wellenmechanischen Konzepten, die praktizierende Physiker nicht zu stören scheint, zumal sie gewohnt sind, Wellenfunktionen als statistisch-dynamische Teilchenverteilungen zu interpretieren. Das ist auch der Grund, warum zeitunabhängige Quantenzustände gewöhnlich als „stationär“ und nicht als „statisch“ bezeichnet werden. Zum Beispiel wird die Impulsunschärfe in Energieeigenzuständen, obwohl sie als Konsequenz des Fouriertheorems für stehende Wellen zu verstehen ist, im Heisenbergbild traditionell als Argument für eine „Nullpunktbewegung“ interpretiert. Das (erstmal wohl klar in Diracs Lehrbuch von 1930 formulierte) Superpositionsprinzip erschien mir dagegen als das eigentliche und fundamentale Prinzip der Quantentheorie, das überall in Erscheinung tritt und damals ganz aktuell in der Superposition eines *K-Mesons* mit seinem Antiteilchen zu *einem neuen Teilchen*, das die Verletzung der Spiegelungssymmetrie bei schwachen Wechselwirkungen erklärt, auf dramatische Weise bestätigt worden war. Diese Superposition von nur zwei Basiszuständen besitzt formal eine große Ähnlichkeit mit den Energieeigenzuständen chiraler (also nicht spiegelungssymmetrischer) Moleküle, wie Zucker oder Ammoniak, die makroskopisch den Superpositionen einer rechten und einer linken Hand als einem klassisch

unmöglichen, ganz neuartigen Zustand einer Hand entsprechen würden. (Schrödingers berühmte zwei Katzenzustände tot und lebendig sind dagegen *nicht* einfach durch eine Symmetrietransformation verknüpft.) Die sich ergebende grundsätzliche Frage lautet also: Wann und warum bricht das Superpositionsprinzip zusammen, wie es in der Kopenhagener Deutung stillschweigend für alle Quantenmessungen angenommen wird und in diversen axiomatischen Formulierungen der Quantentheorie in Form von „Superauswahlregeln“ auch explizit postuliert wurde.

Da eine meiner wissenschaftlichen Publikationen zu diesen Fragen aus der Kernphysik unter dem Titel „Symmetrieverletzende Modellzustände und kollektive Bewegungen“ als Habilitationsschrift noch in deutscher Sprache erschienen ist (Nummer 2 der Publikationsliste am Ende des Buches), hatte ich ursprünglich die Absicht, sie hier aufzunehmen. Für den Rahmen dieses Buches ist sie jedoch zu technisch. So habe ich mich stattdessen entschlossen, den ersten Teil eines im Jahre 2005 in Paris auf Einladung von T. Damour gehaltenen englischen Vortrags mit dem Titel „Roots and fruits of decoherence“, in dem ich auf dessen Wunsch auf diese Vorgeschichte eingegangen bin, für diesen Zweck auf deutsch zu formulieren (Kap. 13). Denn mich hatten diese Fragen aus der Kernphysik damals dazu geführt, analoge Betrachtungen spekulativ auf makroskopische Systeme, den Messprozess und dann konsequenterweise auf das ganze Universum anzuwenden. Das ist in dem unveröffentlichten Manuskript „Probleme der Quantentheorie“ von 1968 nachzulesen (Kap. 12), das seinerzeit von mehreren deutschsprachigen Journalen abgelehnt wurde. Fast alle Physiker waren damals der festen Überzeugung, dass „die Quantenmechanik dafür“ (also etwa für makroskopische Apparate und deren Umgebung) „nicht gemacht“ sei, wie sie sich ausdrückten. Mikro- und Makrophysik galten als zwei getrennte Regime der Physik. Meine Versuche, den Zusammenhang im Rahmen einer universellen Quantentheorie zu verstehen, galten demnach als „wilder Unsinn“. Dieses Manuskript enthält aber offensichtlich bereits sowohl den Grundgedanken der Dekohärenz als auch den der „Vielen Welten“. Obwohl es noch keine Zitate enthält, hätte ich damals selbstverständlich den Namen Everett erwähnt, wenn mir dessen Arbeit bereits bekannt gewesen wäre.

Auch die Anfang 1969 in einer ersten Version fertiggestellte und heute viel zitierte englische Fassung (Nummer 3 der Publikationsliste) wurde zunächst von mehreren Journalen abgelehnt, bis mir Eugene Wigner, dem ich einen Entwurf zugesandt hatte, zu Hilfe kam und eine Veröffentlichung im ersten Heft der Zeitschrift *Foundations of Physics* befürwortete, wo sie Ende 1970 schließlich erschien. Sie wurde zunächst aber kaum beachtet. Erst meine Arbeit mit Erich Joos von 1985 brachte einen gewissen Durchbruch, der im deutschsprachigen Bereich aber eher als ein störendes Leck aus einer unerwünschten Welt betrachtet wurde. Später wurde versucht, das Dekohärenzkonzept Wojciech Zurek zuzuschreiben, der es 1980 als erster ernsthaft aufgegriffen und sich in der Tat große Verdienste für seine Vervollständigung und Verbreitung erworben hat. In der Folge hat er jedoch eine Plethora von m. E. eher verwirrenden Vokabeln oder sprachlichen Bildern (wie existenzielle Interpretation, Envarianz, predictability sieve, environment as a witness, quantum discord, Quanten-Darwinismus usw.) eingeführt, die alle nur mehr oder weniger unterschiedliche Aspekte der quantenmechanischen Verschränkung

und Dekohärenz bezeichnen, dabei aber deren eigentlicher Konsequenz (nämlich der einer universellen Wellenfunktion) rein verbal ausweichen. Weitere historische Details zur Entstehung des Dekohärenzbegriffs kann man in zwei Beiträgen von Olival Freire Jr. und Kristian Camilleri in Heft 4 der Zeitschrift *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, Vol. 40 (Dezember 2009) nachlesen.

Im Folgenden mache ich nun weitere Anmerkungen zum Ursprung und Zweck der einzelnen Beiträge in der Reihenfolge ihrer Anordnung im Buch:

**Kapitel 2** (Realität und Determinismus in der Quantentheorie) soll einen ersten Überblick über einige bei Physikern verbreiteten Auffassungen über die Quantentheorie und die von ihnen gezogenen Konsequenzen geben. Es ist der (für diesen Zweck überarbeitete) zweite Teil eines Beitrags, den ich 1990 unter dem Titel „Bedeutung und Problematik einiger Grundbegriffe der modernen Physik“ für die bei Vittorio Klostermann erschienenen und von Wolfgang Marx herausgegebenen Proceedings einer interdisziplinären Studiengruppe „Philosophische Grundlagen der Wissenschaften“ verfasst habe. Einige Bemerkungen darin beziehen sich daher auf diese Diskussionen. Der Beitrag beginnt mit einer einfachen Darstellung der Bedeutung der Bellschen Ungleichung. Da er sich vornehmlich an Philosophen richtete, habe ich meine eigenen Vorstellungen über die Interpretation der Quantentheorie hier nur im Schlussabschnitt kurz angedeutet. Der erste Teil der damaligen Publikation ist inhaltlich unabhängig und bezieht sich auf die relativistische Raumzeit. Er erscheint daher hier als erster Beitrag der Themengruppe III.

**Kapitel 3** (Wozu braucht man „Viele Welten“ in der Quantentheorie?) ist ein WebEssay, den ich im September 2007 auf meine website gestellt habe, als die auf Hugh Everett zurückgehende Viele-Welten-Interpretation aus Anlass des fünfzigjährigen Jahrestages ihrer Entstehung international (und außerhalb der Fachphysik nun auch in deutschen Journalen) diskutiert zu werden begann. Er tauchte damals sogar im Roman „Schilf“ meiner Namenskollegin Juli Zeh auf, der sich mit zwei befreundeten, aber in ihren Auffassungen konkurrierenden Physikern beschäftigt. Leider wird der Begriff eines „Multiversums“ neuerdings aber häufig in relativ trivialer Form für diverse spekulative Kosmologien missbraucht, wogegen sich dieser Aufsatz unter anderem richtet. Die „Vielen Welten“ im Sinne der Quantentheorie sind dagegen eine zwar extrem ungewöhnliche (und daher unerwünschte) aber völlig konsistente Konsequenz der bestbestätigten Gleichung der Physik, *wenn* man diese nur (im Gegensatz zur pragmatischen Tradition) als universell gültig annimmt. (Der Leser mag es vorziehen, die [Abschn. 3–5](#) dieses Beitrags bei der Lektüre des Buches zunächst zurückzustellen.)

**Kapitel 4** (Von „Vielen Welten“ zur Quantendekohärenz?) ist ein im April 2008 im Spektrum der Wissenschaft erschienener Kurzkomentar zur Übersetzung von Peter Byrnes Artikel über Hugh Everett im Scientific American. Bemerkenswerterweise bezeichnet der Autor darin Everetts Viele-Welten-Interpretation (wie sie eigentlich erst später genannt wurde) als einen Vorläufer der Dekohärenztheorie – offenbar weil diese im Gegensatz zu den Vielen Welten heute allgemein akzeptiert wird, während viele Physiker den naheliegenden Zusammenhang zwischen

den beiden Theorien immer noch nicht einzusehen bereit sind. (Es ist immer noch bequemer, einfach irgendwo eine begriffliche Grenze der Quantentheorie anzunehmen.) In meiner bereits 1970 erschienenen und heute oft zitierten Arbeit (s. deren deutschsprachigen Vorläufer [Kap. 13](#)) ergab sich dagegen umgekehrt und – wie mir schien – notwendigerweise ein Übergang von Dekohärenzargumenten zu der damals bei Physikern praktisch unbekanntem Interpretation, die Everett schon im Jahr 1957 vorgeschlagen hatte. In meiner Arbeit mit Erich Joos von 1985 haben wir diesen Bezug geflissentlich unterdrückt, um unsere Arbeit publikationsfähig zu gestalten.

Der Aufsatz [Kap. 5](#), entstanden im Dezember 2009, ist der Namensgeber für dieses Buch, da er dessen übergreifendes Grundmotiv wiedergibt. Er entstand als Ergänzung zu [Kap. 3](#) und als Reaktion auf Argumente, die besagen sollen, dass die von Everett und anderen gezogenen Konsequenzen auf der unberechtigten *Voraussetzung* beruhen, wonach die Wellenfunktion „realistisch“ zu interpretieren sei. Gilt doch jede Annahme einer mikroskopischen Realität in der modernen Physik als *naiv*! Ich habe in diesem WebEssay daher das Realitätskonzept, wie es traditionell und erfolgreich für die Naturbeschreibung benutzt und erst im Rahmen der Kopenhagener Deutung für die Mikrophysik abgeschafft wurde, ausführlich diskutiert. Während klassische Konzepte, wie etwa das von Partikeln, zweifellos nicht mehr konsistent anwendbar sind, gilt dies eben nicht für die Wellenfunktion – auch wenn deren universelle Existenz, genauso wie Einsteins gekrümmte Raumzeit (s. [Kap. 15](#) und [16](#)) streng genommen nicht beweisbar ist.

Der weitere WebEssay [Kap. 6](#) (Wie viele Everett-Welten gibt es eigentlich?) versucht eine Frage zu beantworten, die mir Robert Czepl vom ORF im Oktober 2010 im Rahmen eines Interviews zu einer Sendung über Peter Byrnes Everett-Biographie (Oxford UP 2010 – eine deutsche Übersetzung ist bei Springer in Vorbereitung) stellte. [Kapitel 7](#) schließlich ist eine 1989 geschriebene Rezension zu John Bells Sammlung seiner Arbeiten zur Quantentheorie („Speakable and unspeakable in quantum mechanics“), in der ich Argumente wiedergebe, die ich mit ihm gegen Ende der siebziger Jahre ausführlich brieflich ausgetauscht hatte (s. a. [Abschn. 5](#) von [Kap. 5](#)).

Teil II beginnt mit [Kap. 8](#) (Ist das Problem des quantenmechanischen Messprozesses nun endlich gelöst?) als einem weiteren Kommentar aus dem Spektrum der Wissenschaften – diesmal vom April 2001 zum Artikel von Max Tegmark und John Wheeler über das Thema „100 Jahre Quantentheorie“, in dem die Autoren die Bedeutung des Dekohärenzkonzepts für das Verständnis der Theorie herausstellten, was damals für viele Physiker immer noch überraschend war.

[Kapitel 9](#) (Dekohärenz und andere Quantenmissverständnisse) ist die Niederschrift eines Vortrags, den ich im Juni 2009 bei einem Symposium für Lehramtskandidatenbetreuer an der Universität Karlsruhe gehalten habe. Hier und im folgenden kann der Nichtphysiker rein formale Argumente einfach übergehen – etwa wenn von der „Dichtematrix“ die Rede ist. Als Ergänzung zum Vortrag hatte ich damals für Diskussionszwecke noch einige der meines Erachtens „verbreitetsten Missverständnisse über die Quantentheorie“ aufgelistet. Da einzelne Punkte davon auch häufig von meinen Kollegen in Frage gestellt werden, habe ich hier zu allen Punkten

noch Begründungen meines Standpunkts oder Klarstellungen meiner Behauptungen angefügt. Danach (als [Kap. 10](#)) folgt ein aus dem Englischen übersetzter WebEssay mit dem Originaltitel „The Essence of the Concept of Decoherence“ vom Juni 2010, der das Wesen dieses Konzepts klarstellen und – ähnlich wie [Kap. 9](#) – gegen Vereinfachungen und Missverständnisse abgrenzen soll.

[Kapitel 11](#) (Wie groß ist ein Photon?), verfasst im Oktober 2010, bezieht sich auf eine Frage, die ebenfalls bei dem karlsruher Symposium ([Kap. 9](#)) aufkam und eng mit dem Thema Dekohärenz zusammenhängt, ohne dass der Zusammenhang bei der damaligen Gelegenheit diskutiert werden konnte. Er beleuchtet u.a. den Zusammenhang von Quantenmechanik und Quantenfeldtheorie.

[Kapitel 12](#) (Probleme der Quantentheorie) von 1968 und [Kap. 13](#) (Wurzeln der Dekohärenz in der Kernphysik) von 2005, das sich auf meine Arbeiten aus der Zeit von 1965–1967 bezieht, sind die zwei oben bereits ausführlich erwähnten „historischen“ Beiträge. Zwischen ihnen und den schon genannten späteren Aufsätzen besteht eine große zeitliche Lücke, während der die fachspezifische Diskussion des Dekohärenzkonzeptes und dessen Anwendung im Vordergrund standen (fast ausschließlich in englischer Sprache – s. die Publikationsliste am Schluss des Buches).

[Kapitel 14](#) (Feynman’s Interpretation of Quantum Theory) enthält Kommentare zu einer ursprünglich nicht zur Publikation vorgesehenen (aber inoffiziell ausführlich dokumentierten) freien Diskussion zwischen führenden Theoretischen Physikern aus dem Jahre 1957 in Chapel Hill zum Thema Gravitation. Der von mir vollständig zitierte und dabei kommentierte Ausschnitt bezieht sich auf die Quantisierung der Gravitation und wird von Richard Feynman dominiert, wobei die Diskussion sich auf die Quantisierung makroskopischer Objekte im allgemeinen ausweitet. Damit gibt er einen wohl einmaligen Aufschluss über Feynmans Interpretation der Quantentheorie. Die Diskussion führt auf Fragestellungen, deren Beantwortung Dekohärenzargumente oder sogar die von Everett gezogene Konsequenz verlangen würde, dessen Dissertation kurz nach der Chapel-Hill-Konferenz erschien und Feynman bereits bekannt gewesen zu sein scheint. Ich habe diesen Beitrag nicht übersetzt, da er überwiegend aus Zitaten und meinen ebenso „spontanen“ Reaktionen darauf besteht.

Die Aufsätze in Teil III befassen sich mit dem Zeit- und Raumzeitkonzept. Die Relativitätstheorie war zwar nie mein eigentliches Arbeitsgebiet, aber einerseits ist der quantenmechanische Messprozess eng mit der allgemeinen Frage der Irreversibilität (also dem „Zeitpfeil“) verknüpft, während andererseits eine universelle Quantentheorie auch die Gravitation einschließen muss, was zu ganz neuartigen begrifflichen Problemen führt. Wegen der allgemeinen Verschränkung im Quantenuniversum sind die diversen Anwendungsgebiete der Quantentheorie grundsätzlich nicht zu trennen (s. [Kap. 18](#)). Aus diesem Grund habe ich zwischen 1980 und 1990 wiederholt Vorlesungen über das Problem der Zeitrichtung in verschiedenen Gebieten der Physik gehalten, was zunächst zur Publikation von *Lecture Notes* in deutscher Sprache (Die Physik der Zeitrichtung, Springer 1984) und anschließend zu dem englischsprachigen Buch „The Physical Basis of the Direction of Time“ (in fünf Auflagen von 1989 bis 2007, ebenfalls bei Springer) führte.

**Kapitel 15** (Räumliche Veranschaulichung der relativistischen Raumzeit) ist der in **Kap. 2** fehlende erste Teil der Publikation von 1990, der versucht, die relativistische Raumzeit und insbesondere den Inhalt des Relativitätsprinzips anschaulich aber nicht trivialisierend insbesondere für Nichtphysiker darzustellen. Die räumlich-geometrische Darstellung ist zwar elementar, erfordert aber eine gewisse Bereitschaft zur Abstraktion.

**Kapitel 16** (Über die „Zeit in der Natur“) ist ein Aufsatz für den Band „Evolution und Irreversibilität“ des *Jahrbuchs Selbstorganisation* von 1997. Der Titel soll den Gegensatz zu dem von Philosophen häufig vorausgesetzten subjektiven („unmittelbar zugänglichen“) Zeitbegriff betonen. Der letzte Abschnitt versucht, das Verschwinden eines formalen Zeitkonzepts bei Anwendung der Quantentheorie auf die Gravitation zu erläutern. Auch der WebEssay **Kap. 17** (Was heißt: Es gibt keine Zeit?) ist dieser fundamentalen Konsequenz der Quantengravitation gewidmet. Er entstand im Jahr 2000 aus Anlass der Popularität von Julian Barbour's Buch „The End of Time“ (Weidenfels and Nicolson, 1999), an dessen Entstehungsgeschichte Claus Kiefer und ich intensiv beteiligt waren. Dieses Thema wird daher auch sehr kompetent in Kiefers Buch „Der Quantenkosmos“ (bei S. Fischer, 2008) diskutiert.

Das Problem der Zeit in der Quantengravitation tritt auch wesentlich in **Kap. 18** (Warum Quantenkosmologie?) auf. Dieser Beitrag entstand aus einem Vortrag, den ich schon 1993 an der interdisziplinären Forschungsstätte der evangelischen Studiengemeinschaft (FEST) in Heidelberg gehalten habe, wo Ion-Olympiu Stamatescu ein sich über mehre Jahre erstreckendes Seminar über Grundlagenprobleme der Physik (mit dem damals an deutschen Universitäten noch völlig unbeachteten Schwerpunktthema Dekohärenz) veranstaltete, das 1996 zu einer gemeinsamen Buchveröffentlichung von sechs Autoren führte (Nummer 25 der Publikationsliste). Der Titel meines hier wiedergegebenen Vortrags richtet sich gegen die damals und zum Teil auch heute noch von den meisten Physikern vertretenen Meinung, dass die Quantentheorie für Kosmologie nur indirekt (nämlich nur bei der Beschreibung bestimmter Eigenschaften der Materie) zuständig sei. Die Erwähnung einer Wellenfunktion des Universums hätte damals bestenfalls Heiterkeit, normalerweise aber energische Ablehnung hervorgerufen.

Danach folgen vier vornehmlich für Physiker geschriebene Beiträge (wobei **Kap. 21** aber auch problemlos für Nichtphysiker lesbar sein sollte). **Kapitel 19** (Die Suche nach dem Urzeitpfeil) ist eine Zusammenfassung des Problems der diversen, eng verknüpften physikalischen Zeitpfeile für die *Physikalischen Blätter* von 1986, seinerzeit ausgelöst durch meine deutschsprachigen Lecture Notes von 1984. Nichtphysiker sollten hier den etwas formalen Absatz im Zusammenhang mit kosmischen Phasenübergängen überspringen.

**Kapitel 20** (Der Zeitbegriff in der Quantentheorie) ist die Übersetzung eines Beitrags unter dem Titel „Time in Quantum Theory“ aus dem *Compendium of Quantum Physics* (D. Greenberger, K. Hentschel und F. Weinert, Hrsg., Springer 2008), der die diversen Facetten des Zeitbegriffs in der Quantentheorie einschließlich seiner, in **Kap. 18** ausführlicher diskutierten, eigenen Quantisierung anreißt.

**Kapitel 21** (Ist M-Theorie Physik?) fällt etwas aus dem Rahmen, denn es ist eine „Polemik“, die ich 1999 aus Anlass der euphorischen Medienkommentare über eine Konferenz über String-Theorien in Potsdam als E-Mail an eine Reihe von Kollegen gerichtet und später als WebEssay auf meine Website gestellt habe. Aus ihren Reaktionen konnte ich entnehmen, dass meine (sehr kritischen) Ansichten zu dieser Art von nach meiner Ansicht physikalisch völlig unbegründeten „Theorien“ von den meisten Kollegen (falls sie nicht selber über String-Theorie arbeiten) geteilt wurde. Keine nichttriviale Prophezeiung der String-Theoretiker ist bis heute eingetroffen. Erwähnenswert ist höchstens, dass meine damalige „offene E-Mail“ lange vor Peter Woits kritischem Buch „Not Even Wrong“ (Basic Books, 2006) geschrieben wurde. Ich glaube jedenfalls, dass solche Theorien heute überhaupt nur deshalb *als Physik* diskutiert werden können, weil man die Frage nach der einer Theorie zugrundeliegenden Realität kaum noch stellt oder sich auf naive klassische Vorstellungen zurückzieht (s. hierzu auch Feynmans abschließende Bemerkungen in [Kap. 14](#)). Dieses Gebiet der String-Theorien wird in der Tat fast nur von Mathematikern bevölkert, die es gewohnt sind, die Axiome ihrer Theorien frei für den jeweiligen Zweck definieren zu dürfen. Deswegen ist es auch nicht verwunderlich, dass sie gewöhnlich zur algebraischen Formulierung der Quantentheorie in Form reiner „Rechenrezepte“ im Heisenbergbild statt zum Schrödingerbild mit seinem konkreten dynamischen Zustandskonzept tendieren.

Für die des Englischen mächtigen Leser – und vermutlich ausschließlich für Physiker – habe ich als [Kap. 22](#) schließlich eine für einen anderen Zweck geschriebene, aber bisher noch nicht erschienene zusammenfassende Arbeit zum Thema „The Nature and Origin of Time-asymmetric Spacetime Structures“ aufgenommen, die einige drastische kosmologische Konsequenzen einer universellen Quantentheorie beleuchten soll. Dazu gehört das vieldiskutierte *information loss paradox* Schwarzer Löcher ebenso wie die Frage der Existenz einer Zeit vor dem Urknall. In beiden Fällen wird der Quantenaspekt dieser Fragestellungen sowie die Abhängigkeit ihrer Beantwortung von der am Ende des Vorworts erwähnten „Definition“ der physikalischen Realität von den meisten Kosmologen gewöhnlich einfach übergangen. Denn nur im Everettschen Multiversum kann die in Schwarzen Löchern verschwundene „Information“ bei deren Zerstrahlung wirklich erhalten bleiben, da sie bei unitärer Beschreibung im Wesentlichen in den normalerweise als irrelevant betrachteten Phasenbeziehungen zwischen den vielen „Welten“ steckt (was gerade deren Dekohärenz voneinander ausmacht und die Zunahme der effektiven Entropie erklärt). Ich sollte aber hier darauf hinweisen, dass meine hier zum Ausdruck gebrachte Vermutung der Nichtexistenz des Inneren Schwarzer Löcher allen traditionellen Vorstellungen widerspricht.

Es ist schon merkwürdig und bezeichnend für die gegenwärtige Situation der Physik, dass man ein Verschwinden von „Information“ bei der Zerstrahlung Schwarzer Löcher als Paradoxon diskutiert, während man im Labor einen Kollaps der Wellenfunktion ständig und bereitwillig akzeptiert. Aus ähnlichem Grund wie bei unitär beschriebenen Schwarzen Löchern könnte auch höchstens das Multiversum als Ganzes, also seine vollständige Wellenfunktion, unitär zeitlich rückwärts

nach jenseits des Urknalls fortgesetzt werden – nicht aber eine individuelle quasi-klassische „Welt“. Der mathematisch weniger interessierte Leser mag in diesem Beitrag die formale Definition der Kruskal-Koordinaten in Abschn. 2 übergehen, sollte sich aber mittels der Figuren eine Vorstellung von der Raumzeit-Geometrie Schwarzer Löcher und der im letzten Absatz dieses Abschnitts beschriebenen, sich daraus ergebenden kausalen Zusammenhänge zwischen ihrem Inneren und Äußeren zu verschaffen suchen. Ergänzend zum Text, den ich in diesem Fall nicht verändern wollte, sei hier noch angemerkt, dass diese speziellen Koordinaten so gewählt sind, dass Vorwärtslichtkegel sich, wie in der Figur angedeutet, in dieser Darstellung überall mit  $\pm 45$  Grad um die Vertikale öffnen, während dafür Längenmaße (vgl. [Abb. 15.12](#)) entsprechend der exponentiellen Form der Metrik in Gl. (22.2) extrem ortsabhängig sind.

**Teil I**  
**Wellenfunktion und Realität**

# Kapitel 2

## Realität und Determinismus in der Quantentheorie

### 1 Vorbemerkungen

Ähnlich wie die Relativitätstheorie legt die Quantentheorie einen allgemeinen begrifflichen Rahmen fest, in den sich alle physikalischen Theorien einzuordnen haben. Während Werner Heisenberg und seine Zeitgenossen anfangs noch glaubten, nur eine Theorie der Atome zu entwickeln, sind nach heutigem Wissen *alle* physikalischen Systeme zwecks korrekter Beschreibung zu „quantisieren“ (womit die Anwendung eines bestimmten formalen Schemas gemeint ist). Im Gegensatz zur Relativitätstheorie, deren neues Begriffssystem zu einer klar definierten, ganz neuartigen Raumzeitgeometrie führte, welche die vorher getrennten Begriffe von Raum und Zeit ersetzt, wird die Quantentheorie häufig aber nur als ein Werkzeug zur Berechnung von Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten bestimmter, weiterhin klassisch zu beschreibender Messergebnisse oder anderer, stochastisch auftretender *Ereignisse* verstanden. Anstelle von neuen kinematischen Konzepten zur Beschreibung der mikroskopischen Realität werden sich widersprechende Begriffe, abgeschirmt durch Unbegriffe wie „Dualität“ oder „Komplementarität“, benutzt oder nur Einschränkungen in der Anwendbarkeit eben der klassischen Begriffe (etwa durch die Heisenbergsche Unschärferelation) eingeführt. Auf die Frage, welche der alternativ benutzten Konzepte denn nun „wirklich“ beschreibe, was jeweils vor sich geht, wurde von der *Kopenhagener Interpretation* die Antwort gegeben, dass den mikrophysikalischen Objekten an sich *gar keine* realen Eigenschaften zukämen. Offenbar ist mit dieser Ablehnung einer mikroskopischen „Realität“ also der Verzicht auf eine konsistente Beschreibung der Mikrowelt gemeint. Je nach persönlicher Einstellung haben sich die Physiker mehr oder weniger pragmatisch mit dieser Situation abgefunden (was für die Mehrheit von ihnen zutrifft), oder sie betrachten sie als skandalös oder unhaltbar und somit vorläufig.

---

Überarbeitete und ergänzte Fassung des zweiten Teils eines Beitrags (mit dem Titel *Bedeutung und Problematik einiger Grundbegriffe der modernen Physik*) zu dem Band *Philosophische Grundlagen der Wissenschaften*, Wolfgang Marx, Hrsg., Klostermann 1990. Einige Bemerkungen beziehen sich auf Spezifika aus Diskussionen, die der ursprünglichen Publikation vorausgingen. Der erste Teil meines damaligen Beitrags betrifft die Relativitätstheorie und ist in diesem Buch als [Kap. 15](#) zu finden.

Da sich zudem große Schwierigkeiten ergeben, das Zustandekommen der in der Alltagswelt und insbesondere in Form von Messergebnissen beobachteten „klassischen“ Eigenschaften aus dem erfolgreichen Formalismus der Quantentheorie zu verstehen, wurde immer wieder versucht, dessen Gültigkeit irgendwie einzuschränken, was jedoch auf erhebliche Konsistenzprobleme führt. Im Verlauf der Entwicklung mussten die Grenzen seiner Anwendung vielmehr mehrfach ausgeweitet werden, so dass man vielleicht eher durch eine radikale Neuinterpretation der erfolgreichen formalen Theorie weiterkommen mag, was in diesem Buch ausführlich diskutiert werden soll.

## 2 Der Realitätsbegriff in der Quantenmechanik

Obwohl zu Beginn der dreißiger Jahre die formale Entwicklung der Quantenmechanik bereits abgeschlossen war und sich die Kopenhagener Deutung aufgrund des Verlaufs der Bohr-Einstein-Debatte (und vor allem deren Rezeption in den Lehrbüchern) weitgehend durchgesetzt hatte, begann in den Sechzigern erneut eine Diskussion unter einer Gruppe vornehmlich jüngerer Physiker. Um Missverständnissen vorzubeugen sei zunächst angemerkt, dass diese *neue Diskussion um die Quantenmechanik* keinen ernsthaften Einfluss auf die Anwendungen der Theorie durch den praktisch arbeitenden Physiker hatte, sondern außer einigen neuartigen experimentellen Tests nur ihre Interpretation und damit auch die Frage ihrer Extrapolation auf den bisher nicht experimentell zugänglichen Bereich (etwa die Kosmologie) betraf.

Eine zentrale Rolle bei dieser neuen Diskussion spielten zwei von John Bell im Jahr 1964 geschriebene Arbeiten. In der ersten konnte er zeigen, dass ein bis dahin allgemein akzeptierter, auf John von Neumann zurückgehender Beweis der Unmöglichkeit „versteckter Variablen“ zur Beschreibung einer noch unentdeckten Physik hinter der Quantenmechanik, die die Interpretationsprobleme möglicherweise auf einigermassen traditionelle Weise lösen könnte, auf nicht gerechtfertigten Annahmen beruht. Im zweiten bewies er aber dafür zwingend, dass alle solchen und mit den nachprüfbar Aussagen der Quantenmechanik verträglichen Theorien sehr ungewöhnliche Eigenschaften haben, nämlich in einem nichttrivialen Sinn „nichtlokal“ sein müssen. Die Beurteilung dieser Beiträge durch die Physiker-gemeinde variierte zwischen „Jahrhundertentdeckung“ und „nichts Neues“. Ich halte beide Standpunkte für überzogen, den ersten, weil schon die Entdecker der Quantenmechanik – wenn auch mehr intuitiv und in unterschiedlichem Maße – deren Ungewöhnlichkeit erkannten, den zweiten, weil ihre Wortführer mit der Kopenhagener Deutung (vielleicht voreilig) die radikalste, aber ihrem weltanschaulichen Wunschdenken offenbar nächstliegende von drei wesentlich verschiedenen möglichen Konsequenzen zogen.

Der zweite Beitrag Bells wurde besonders populär, weil er eine experimentelle Überprüfung der Quantenmechanik an einer kritischen Stelle erlaubte. Obwohl deren Aussagen in den später durchgeführten Experimenten (für die Mehrheit der