

H. Dieter Zeh

PHYSIK OHNE REALITÄT:

Tiefsinn **ODER** Wahnsinn?



Springer

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

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)

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, 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.

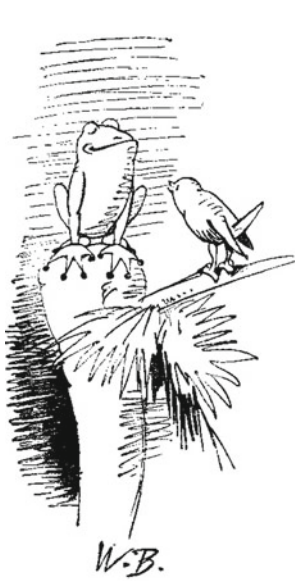
Am Ergebnis zeigt sich aber trotz der dabei angenommenen universellen und sogar deterministischen Naturbeschreibung, dass die von vielen Menschen als Bedrohung angesehene Berechenbarkeit „unserer“ Welt durch die Eigenheiten der Quantentheorie schon im Prinzip (also nicht nur praktisch, wie etwa in der 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 Busch¹ -



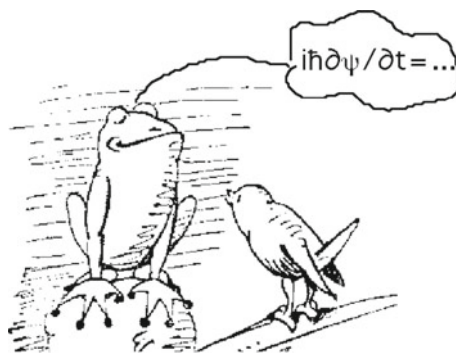
Wenn einer, der mit Mühe kaum
Gefroschen ist auf einen Baum,



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.

¹ Wilhelm Busch: Der fliegende Frosch (Hernach)

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung als Lesehilfe	1
Teil I Wellenfunktion und Realität		
2	Realität und Determinismus in der Quantentheorie	13
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
3	Wozu braucht man „Viele Welten“ in der Quantentheorie?	27
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
4	Von „Vielen Welten“ zur Quanten-Dekohärenz?	45
5	Physik ohne Realität: Tiefsinn oder Wahnsinn?	47
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
6	Wie viele Everett-Welten gibt es eigentlich?	65
7	Rezension zu „Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics“	71

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